



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

# Příprava experimentálního zařízení pro měření rychlosti ve válci termoanemometrickou sondou

## Bakalářská práce

**Autor:** Kryštof Šimána  
**Vedoucí práce:** Ing. Petr Hatschbach, CSc.  
**Studijní program:** Teoretický základ strojního inženýrství

PRAHA 2019



## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šimána, Jméno: Kryštof, Osobní číslo: 458464  
Fakulta/ústav: Fakulta strojní  
Zadávající katedra/ústav: Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel  
Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství  
Studijní obor: bez oboru

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Příprava experimentálního zařízení pro měření rychlosti ve válci termoanemometrickou sondou**

Název bakalářské práce anglicky:

**Preparation of experimental device for in-cylinder velocity measurement by thermoanemometric probe**

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s metodou měření rychlosti proudění pomocí termoanemometrické sondy. Zkonstruujte držák sondy včetně konektorové krabičky pro připravované experimentální zařízení pro měření rychlostního pole ve válci spalovacího motoru a připravte výrobní dokumentaci. Popište postup měření a způsob vyhodnocení při použití dvoukomponentní sondy se žhavenou fólií včetně kalibrace sondy.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Petr Hatschbach, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: 18.04.2019

Termín odevzdání bakalářské práce: 10.07.2019

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Ing. Petr Hatschbach, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.  
podpis odborníky

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

06.05.19

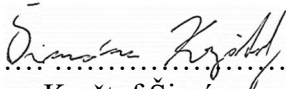
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci „*Příprava experimentálního zařízení pro měření rychlosti ve válci termoanemometrickou sondou*“ vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne: 04.07.2019

  
.....  
Kryštof Šimána

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Petru Hatschbachovi, CSc. za jeho věnovaný čas, věcné poznámky a rady a komplexní vedení při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Janu Lepičovskému, DrSc. za poskytnutí potřebných podkladů k vypracování bakalářské práce a za následné poznámky k teoretické části této práce.

## **Anotace**

Obsahem této práce je popis měření pomocí termoanemometrické sondy a konstrukční řešení jejího držáku. V první části práce je popsáno rozdělení sond, proces kalibrace sondy a následně proces vyhodnocení naměřených dat. Ve druhé části práce autor popisuje konstrukční řešení držáku sondy a konektorové krabičky.

## **Annotation**

The content of this thesis is description of measurement by thermoanemometric probe and structural design of its holder. In the first part of this thesis is described the probe division, the calibration process and process of data evaluation. In the second part of this thesis the author describes design of the probe holder and the connector box.

## **Klíčová slova:**

Termoanemometrie, mapování rychlostního spektra, sonda s děleným vláknem, kalibrace termoanemometrické sondy, držák sondy, konektorová krabička.

## **Keywords**

Thermoanemometry, mapping of velocity spectrum, split-fiber probe, calibration of thermoanemometry probe, probe holder, connector box.

## **Obsah**

Anotace .....	5
Klíčová slova .....	6
Přehled použitých veličin.....	8
1. Úvod.....	9
1.1 Motivace k měření.....	9
1.2 Měřicí zařízení.....	9
2. Měření rychlosti proudění metodou HWA .....	12
2.1. Zapojení měřicí sondy.....	12
2.2. Výběr sondy .....	12
2.3. Typy anemometrických senzorů .....	15
2.3.1. Rozdělení dle tvaru a materiálu sondy.....	15
2.3.2. Rozdělení sond podle počtu senzorů .....	19
3. Kalibrace sondy .....	23
3.1.Rychlostní kalibrace.....	23
3.1.1. Kingův zákon.....	24
3.1.2. Polynom čtvrtého řádu.....	25
3.1.3. Porovnání Kingova zákona s polynomem čtvrtého řádu...	25
3.2. Kalibrace směru proudění .....	26
4. Vyhodnocení naměřených dat .....	29
4.1. Iterační postup .....	29
4.2. Postup založený na minimální hodnotě optimalizační funkce .....	32
5. Konstrukce držáku sondy a konektorové krabičky.....	34
5.1. Konstrukce držáku sondy .....	34
5.2. Konstrukce konektorové krabičky .....	37
Seznam použité literatury .....	42
Seznam obrázků.....	43
Seznam tabulek.....	44

## Přehled použitých veličin:

$E$ [V] .....	Napětí měřené senzorem
$\rho V$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ] .....	Hustota průtoku
$E_0$ [V] .....	Napětí při nulové rychlosti proudění
$U$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ] .....	Rychlost vstupního proudění
$\delta$ [%] .....	Kalibrační nejistota
$\eta$ [ $^\circ$ ] .....	Úhel natočení sondy
$\zeta$ [-] .....	Parametr udávající číslo iterace
$\rho V(\zeta)$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ] .....	Odhadovaná hustota průtoku při $\zeta$ -té iteraci
$\delta E(\eta)$ [V] .....	Odchylka napětí
$E(\eta)$ [V] .....	Napětí při úhlu natočení sondy $\eta$
$E_0$ [V] .....	Napětí při nulovém úhlu natočení sondy
$E(\eta_0)$ [V] .....	Zkorigované hodnoty napětí



# **1. Úvod**

## **1.1. Motivace k měření**

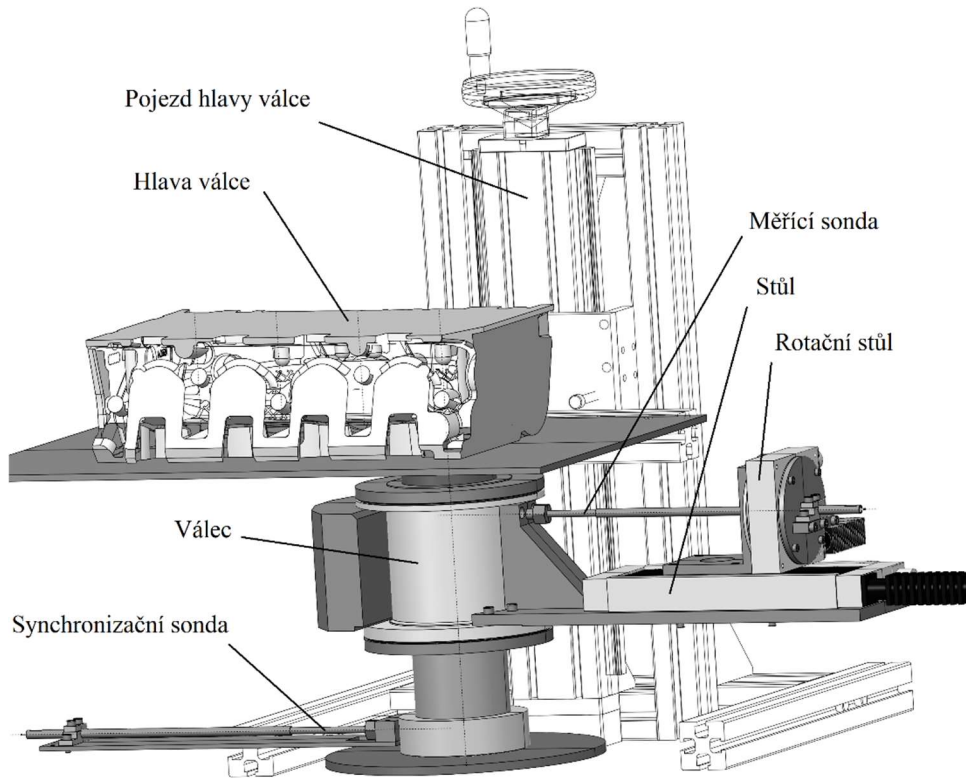
Měření je prováděno ve válci spalovacího motoru při sání. Použitým měřeným médiem je vzduch nasávaný z okolí. Ten je v tomto případě nejideálnější volbou jak z ekonomického, tak i z konstrukčního hlediska.

Vytvoření experimentálního zařízení a následné měření je prováděno z důvodu zmapování rychlostního pole proudění. Rychlost je po určitou dobu měřena na několika místech (při různém natočení a vysunutí sondy), což nám poskytne dostatečně přesná data k vyhodnocení veškerých změn v rychlostním poli v závislosti na čase. Takto zmapované rychlostní pole je porovnáno s numerickým modelem. Na základě tohoto porovnání se určí jak moc se numerický model shoduje se skutečně naměřenými hodnotami, a tedy i jeho míru shody při využití v praxi.

Numerický model je v našem případě prováděný v CFD (Computational Fluid Dynamics) programu AVL FIRE. Do programu bude nahrána geometrie experimentu a následně budou nastaveny veškeré potřebné parametry tak, aby simulace probíhala se stejnými vstupními hodnotami, jako je prováděno měření na experimentálním zařízení.

## **1.2. Měřicí zařízení**

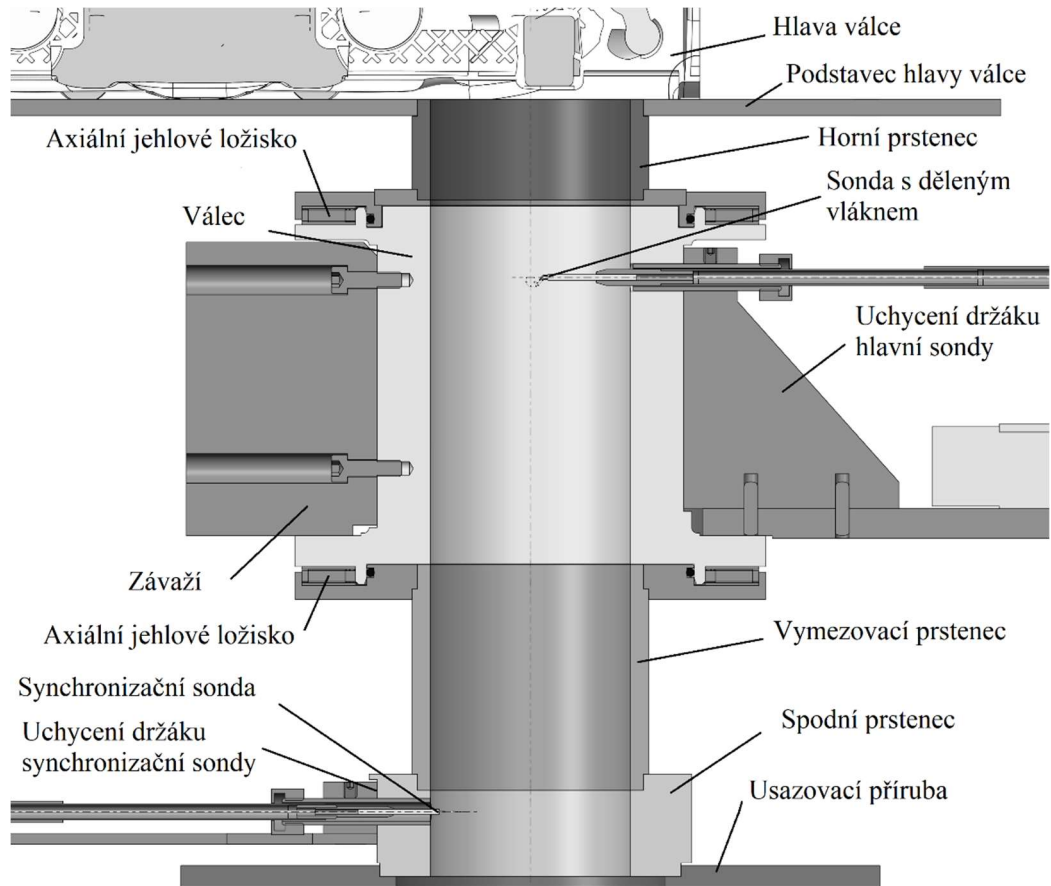
Celé měřicí zařízení (obrázek č. 1) je sestaveno z hlavy válce, umístěné na pojezdu, ze samotného válce, ve kterém je prováděno měření, z měřicí a synchronizační sondy a stolu, na kterém je měřicí sonda umístěna.



Obrázek 1: Měřicí zařízení [12]

Válec je uchycen sérií prstenců (obrázek č.2). Na jedné straně válce se nachází uchycení držáku hlavní sondy a na druhé se nachází závaží. To slouží k vyvážení hmotnosti držáku sondy. Na horním prstenci je umístěna hlava válce ležící na podstavci.

Příprava experimentálního zařízení pro měření rychlosti ve válci termoanemometrickou sondou



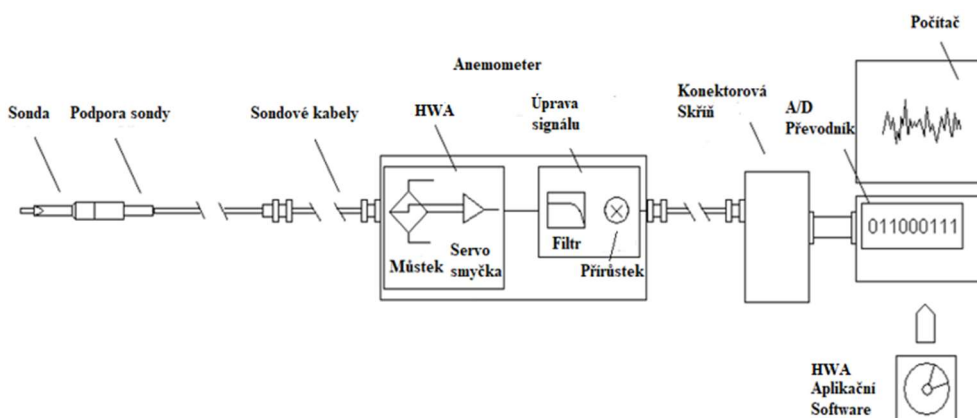
Obrázek 2: Řez měřicím zařízením [12]

## 2. Měření rychlosti proudění metodou HWA

HWA je zkratka pro: Hot Wire Anemometry, což je překládáno, jako měření termoanemometrickou sondou.

### 2.1. Zapojení měřící sondy

Zapojení je prováděno podle měřícího řetězce (obrázek č.3). Ten se obecně skládá ze sondy, podpory (nástavce) sondy + držáku sondy, kabelů, HWA anemometru, přístroje na úpravu signálu, A/D převodníku a počítače. Velmi často bývá součástí HWA anemometru speciální aplikační software sloužící k nastavení HWA a ke sběru dat a jejich následné analýze. Při traverzování sondy během měření, například při zkoumání různých profilů, může být přidán také pojezdový systém. Dále může být použit speciální kalibrační zařízení. To je naprogramováno na kalibraci konkrétního druhu sondy, a tak urychluje experiment (proces kalibrace) – zkracuje provozní čas celého měření, a tak i snižuje jeho cenu. [1]



Obrázek 3: Typický HWA měřící řetězec [1]

### 2.2. Výběr sondy

Při výběru sondy hrají hlavní roli následující parametry:

- Proudící medium [1]
- Počet měřených složek rychlosti (1, 2, nebo 3) [1]
- Očekávaný rozsah rychlostí proudění [1]
- Intenzita turbulence a fluktuace v průtoku [1]
- Změny teploty [1]
- Riziko kontaminace proudícího média [1]

- Prostor kolem měřicího místa (volný průtok, proudění v mezní vrstvě, uzavřené toky) [1]

Konkrétní sondy lze poté volit dle následující tabulky:

Tabulka 1: Použití sond podle měřeného média a typu průtoku

<b>Volné a omezené průtoky</b>		
<b>Typ průtoku</b>	<b>Médium</b>	<b>Doporučené sondy</b>
<b>Rovinný</b>		
Jednosměrný	Plyn	Drátková sonda
		Sonda s jedním sensorovým vláknem (tenká vrstva)
		Sonda s klínovým filmem (tenká vrstva)
	Kapalina	Sonda s kuželovým filmem (tenká vrstva)
		Sonda s jedním sensorovým vláknem (tlustá vrstva)
		Sonda s klínovým filmem (tlustá vrstva)
Obousměrný	Plyn	Sonda s děleným vláknem (tenká vrstva)
	Kapalina	Sonda s děleným vláknem (tlustá vrstva)
<b>Plošný</b>		
1 kvadrant	Plyn	Sonda s dvěma drátky do X
		Sonda s dvěma vlákny do X (tenká vrstva)
		Sonda s klínovým filmem uspořádaným do V (tenká vrstva)
	Kapalina	Sonda s dvěma vlákny do X (tlustá vrstva)
Sonda s klínovým filmem uspořádaným do V (tlustá vrstva)		
Poloviční rovina	Plyn	Sonda s děleným vláknem (tenká vrstva)

	Kapalina	Sonda s děleným vláknem (tlustá vrstva)
<b>Plošný</b>		
Celá rovina	Plyn	Sonda s vlákny, či drátky ve třech různých osách (tenká vrstva)
		Sonda s dvěma drátky do X
	Kapalina	Sondy s děleným vláknem na tři části
		Speciální sondy
<b>Prostorový</b>		
Jeden oktant (70° Kužel)	Plyn	Sonda s drátky ve třech různých osách
		Sonda s vlákny ve třech různých osách (tenká vrstva)
	Kapalina	Sonda s vlákny ve třech různých osách
		Speciální sondy
90° kužel	Plyn	Rotační sonda se šikmým drátkem
	Kapalina	Rotační sonda se šikmým drátkem (tlustá vrstva)
Celý prostor	Plyn	Sonda s filmem schopným snímat ve všech směrech
<b>Průtoky stěn (napětí ve smyku)</b>		
<b>Typ průtoku</b>	<b>Médium</b>	<b>Doporučené sondy</b>
<b>Rovinný</b>		
Jednosměrný	Plyn	Sonda se zapuštěným montážním filmem (tenká vrstva)
		Sonda s nalepeným filmem (tenká vrstva)
	Kapalina	Sonda se zapuštěným montážním filmem (tlustá vrstva)
		Sonda s nalepeným filmem (tlustá vrstva)
		Speciální sondy

[1]

## 2.3. Typy anemometrických sond

Anemometrické sondy se dají dělit podle následujících parametrů:

- Podle tvaru sondy a materiálu senzoru [1]
- Podle počtu senzorů [1]

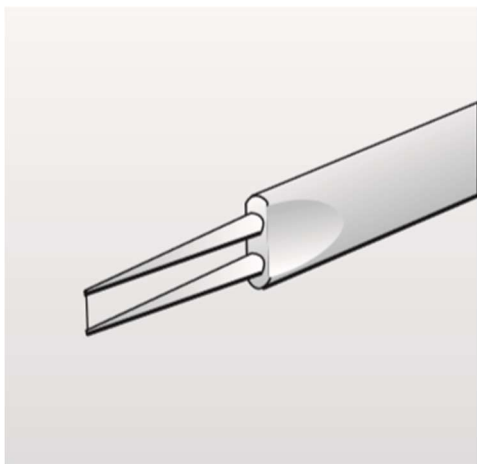
### 2.3.1. Rozdělení podle tvaru sondy a materiálu senzoru

Podle tvaru sondy a materiálu senzoru jsou HWA sondy děleny na čtyři základní typy: Sondy s miniaturním drátkem (Miniatur wires), s pozlaceným drátkem (Gold-plated wires), vláknové sondy (Fibre-film) a filmové sondy (Film-sensors). [1, 4]

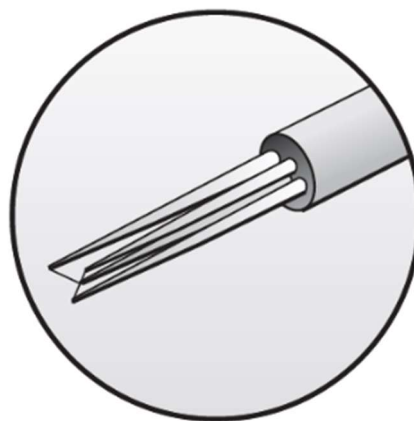
#### 1) Sondy s miniaturním drátkem

Miniaturní drátky jsou vyrobeny z wolframu, mají průměr pouze 5  $\mu\text{m}$  a jejich délka je 1,2 mm. Tyto drátky jsou přivařeny přímo na hroty a celá jejich délka působí jako senzor. Vzhledem k bezprostřednímu umístění drátku na hrot, může být přesnost měření snížena právě rušením hroty. Jejich pevnější konstrukce je však naopak činí vhodnějšími pro měření vysokorychlostních průtoků bez rizika samovolného kmitání.

Sondy opatřené miniaturními drátky jsou universální, doporučované pro většinu měření v jednorozměrných (obrázek č.4), nebo dvourozměrných tocích (obrázek č.5), s nízkou intenzitou turbulence (5–10 %). Z ekonomického hlediska se také jedná o finančně nejprívětivější variantu z důvodu nízké pořizovací ceny a možnosti opravování sondy. [1, 3, 4]



Obrázek 4: Jednoduchá sonda s miniaturním drátkem [3]



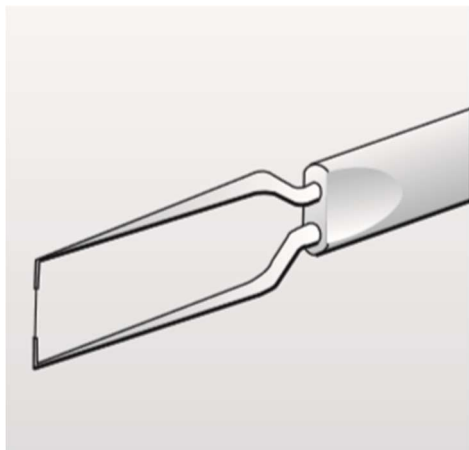
Obrázek 5: X-sonda s miniaturním drátkem [6]

## 2) Sondy s pozlaceným drátkem

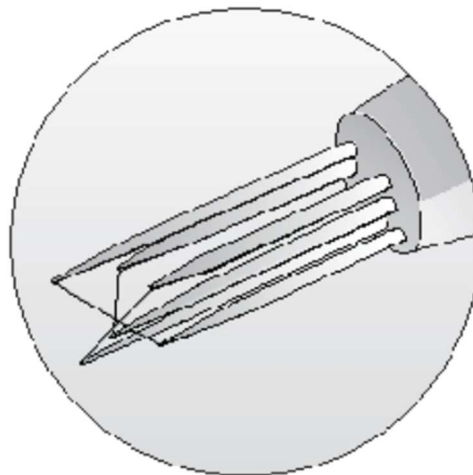
Pozlacené sondy jsou stejně jako miniaturní drátky vyrobeny z wolframu a jejich tloušťka je  $5\ \mu\text{m}$ . Liší se ale v celkové délce sondy, která činí 3 mm. Tento 3 mm dlouhý drátek je na obou koncích pokovený vrstvou zlata a mědi na průměr 15-20  $\mu\text{m}$ , takže uprostřed zbyde pouze 1,25 mm dlouhý aktivní senzor. Takovéto pokovování má dva hlavní významy: definuje přesnou délku snímání (1,25 mm) a snižuje množství tepla rozptýleného hroty (podél drátku je teplota mnohem rovnoměrněji rozložena než u miniaturních drátků). Další konstrukční výhodou je menší rušení průtoku v místě měření zapříčiněné větším odstupem snímací části senzoru od hrotů.

Sondy s pozlaceným drátkem jsou určeny pro měření ve vysokých turbulencích (20-25 %). Dosahují vyšších přesností než sondy s miniaturními drátky, z výše uvedených důvodů. Sondy jsou vyráběny s jedním (obrázek č.6), dvěma, nebo třemi (obrázek č.7) senzory, pro měření v jedno, dvou, nebo třírozměrném prostoru. [1, 3, 4]





Obrázek 6: Jednorozměrná sonda s pozlaceným drátkem [3]

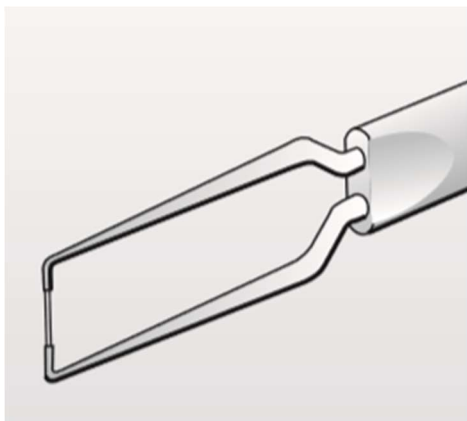


Obrázek 7: Tri-axiální sonda s pozlaceným drátkem [7]

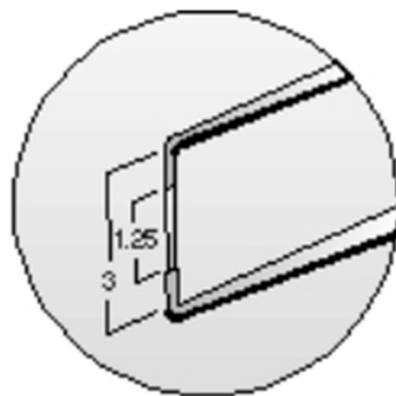
### 3) Vlákňová sonda

Vlákňové sondy (obrázek č.8 a č.9) jsou vyrobeny z křemenného vlákna o průměru 70  $\mu\text{m}$  a délce 3 mm. Vlákno je pokryté tenkým niklovým filmem o tloušťce zhruba 0,1  $\mu\text{m}$ . Konce jsou poměděné a pozlacené, tak aby uprostřed zbyla aktivní délka vlákna 1,2 mm. Vlákno je pak obvykle připájeno na špičky hrotů sondy.

Vlákňové sondy mohou být použity jako náhrada za drátkové sondy jak v kapalinách, tak i v plynech tam, kde je riziko méně čistého proudícího média, a tak je zapotřebí robustnějšího senzoru. Niklový film je chráněn křemenným povlakem. Pro aplikace v plynech se používá tenkých křemenných povlaků – 0,5  $\mu\text{m}$ . Pro aplikace v kapalinách je pak používáno tlustších křemenných povlaků – 2  $\mu\text{m}$ , přičemž jsou navíc pájené spoje a hroty pokryté lakem, který plní funkci elektrického izolantu. Sondy jsou vyráběny s jedním, dvěma, nebo třemi senzory, pro měření v jedno, dvou, nebo třírozměrném prostoru. [1, 3, 4]



Obrázek 8: Vlákňový senzor s filmem [3]



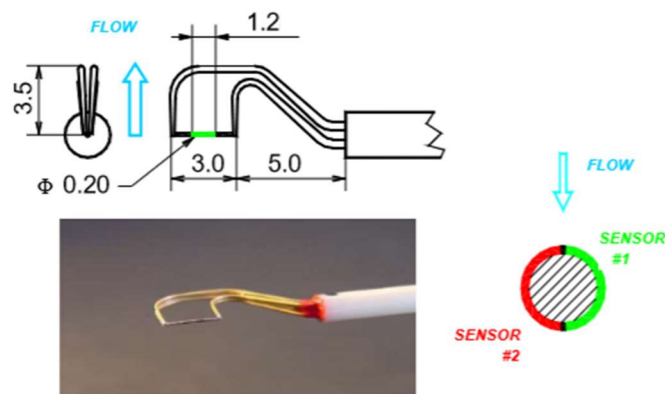
Obrázek 9: Detail senzoru s rozměry [8]

Sondy s jedním žhaveným vláknem/drátkem jsou velice příhodné pro nestabilní rychlostní měření zejména při nízkých, podzvukových tocích. Bohužel jsou ale necitlivé na směr v rovině kolmé ke žhavenému drátku v rozsahu  $\pm 90^\circ$  (do té doby, než dochází k interferenci se špičkami sondy). Z tohoto důvodu je vhodnější použít speciální případ vláknové sondy a tou je sonda s děleným vláknem. [1, 3, 4]

### Sonda s děleným vláknem

Sonda s děleným vláknem (obrázek č.10) má dva paralelní niklové filmy nanesené na stejné křemenné vlákno o průměru 200  $\mu\text{m}$  a délce 3 mm. Konce jsou měděné a pozlacené tak, že aktivní délka sondy je 1,2 mm. Film je chráněn křemenným povlakem o tloušťce 0,5  $\mu\text{m}$ . Vzhledem k tomu, že sonda s děleným vláknem má obvod dělený na dvě nezávislé části, kde každá část je průmětem částečného přenosu tepla zvlášť, tak průměrná hodnota z každé části je nyní závislá na směru proudění (úhlu natočení sondy).

Tyto sondy jsou určeny k měření okamžité rychlosti a směru ve dvourozměrných tocích, kde je vyžadováno vysoké prostorové rozlišení, nebo pro ty případy, kdy úhel náběhu proudění překračuje  $\pm 40^\circ$ . Mohou nahradit sondy s dvojitým senzorem (se senzory do X). Jsou k dispozici ve třech konfiguracích: Pro práci ve volných tocích, v tocích v potrubích a v hraničních vrstvách. Standardní verze jsou navrženy pouze pro práci v plynech. [1, 2, 3]



Obrázek 10: Sonda s děleným vláknem [2]

#### 4) Filmové sondy

Filmové sondy (obrázek č.11) s nekruhovými senzory mají niklový film nanesený v tenké vrstvě na křemenných substrátech různých aerodynamických tvarů, jako například: ploché povrchy, koule, klíny, nebo kužely. Niklový film je pokryt křemenným povlakem tloušťky 0,5  $\mu\text{m}$  pro aplikace v plynech a 2  $\mu\text{m}$  pro aplikace ve vodě. Tento typ patří k nejodolnějším HWA sondám, proto jej lze použít i v méně čistém vzduchu. Je odolnější i než většina optických senzorů.



Obrázek 11: Filmová sonda [3]

#### 2.3.2. Rozdělení sond podle počtu senzorů

Sondy se liší podle toho, zda mají jeden, dva, nebo tři senzory. To úzce souvisí s tím, zda chceme měřit jedno-, dvou-, nebo tří-rozměrné pole.

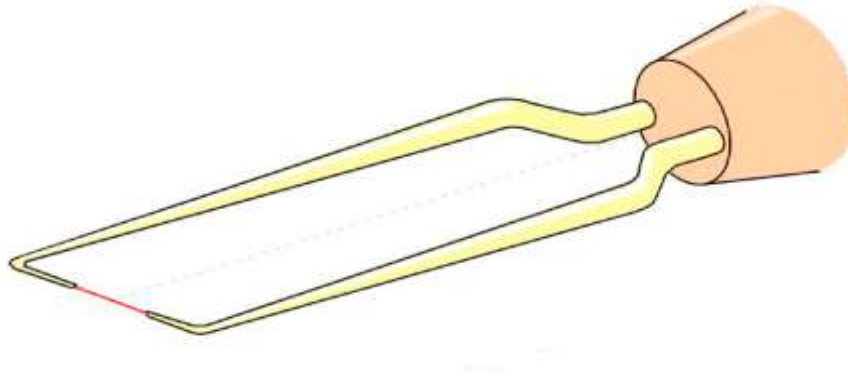
Vzhledem k tomu, že všechny senzory reagují jak na velikost, tak i na směr vektoru rychlosti, mohou být získány tyto veličiny pouze za pomoci dvou a více senzorů umístěných pod různými úhly k vektoru proudění. [1]

### 1) Sondy s jedním senzorem

Jsou vyráběny buď to v normálním, nebo v šikmém provedení. [1]

#### Normální provedení

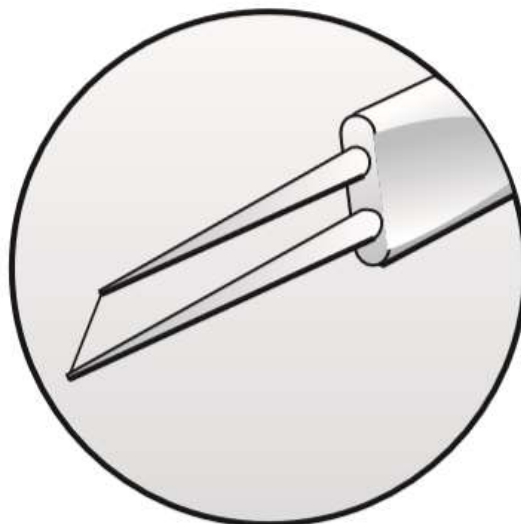
Tyto sondy disponují pouze jedním senzorem. S jejich pomocí se měří pouze jednorozměrné, jednosměrné průtoky. K dispozici jsou sondy s různou geometrií hrotů, na čemž závisí správné upevnění sondy snímače. Ta je upevněna tak, aby byla kolmo na směr proudění a zároveň aby byly hroty paralelně se směrem proudění (obrázek č.12). [1,3]



Obrázek 12: Normální sonda s jedním drátkem [9]

#### Šikmé provedení

Šikmé sondy (obrázek č.13) uzavírají úhel  $45^\circ$  mezi osou snímače a osou sondy. Za použití těchto sond se měří trojrozměrné stacionární toky, ve kterých se ale vektor rychlosti neodchýlí o více než o  $90^\circ$  od prvotního směru. Tímto senzorem musí být v průběhu měření otáčeno. [1, 3]



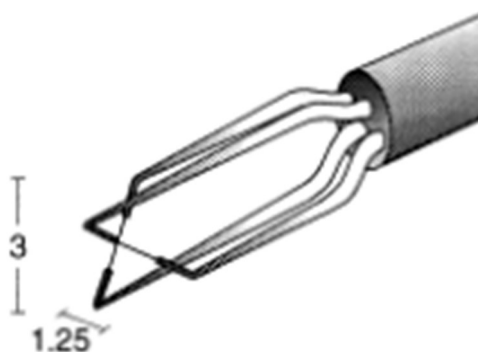
Obrázek 13: Šikmá sonda s jedním drátkem [10]

## 2) Dvou-senzorové sondy

Dvou-senzorové sondy jsou určeny pro měření proudění ve dvourozměrném průtokovém poli. Nejčastěji se vyrábí v provedení do X a ve formě sondy s děleným vláknem. [1]

### Provedení do X

Dvou-senzorové sondy s provedením do x (obrázek č.14) se používají pro dvourozměrné toky, kde vektor rychlosti svírá s osou sondy maximálně úhel  $\pm 45^\circ$ . [1]



Obrázek 14: Dvou-senzorová sonda – provedení do X [11]

### Sonda s děleným vláknem

Sonda s děleným vláknem (obrázek č.10) se používá pro případy, kdy úhel mezi osou sondy a vektorem rychlosti toku přesahuje  $\pm 40^\circ$ . Tato sonda je schopna spolehlivě měřit proudění, která jsou v rozmezí tohoto úhlu až  $\pm 90^\circ$ . [1, 3]

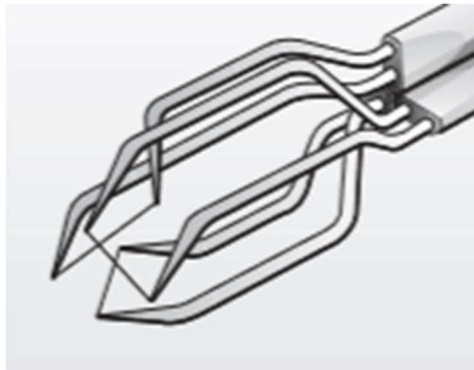
### 3) Troj-senzorové sondy

Do této kategorie patří tříosé sondy a sondy s děleným vláknem na tři části.

[1]

#### Tříosé sondy

Tříosé sondy (obrázek č.15) mají tři navzájem kolmé snímače, skládající se z pozlacených drátků, nebo z vláknitých fólií. Používají se pro měření dvou rozměrných proudových toků, ve kterých je vektor rychlosti v oblasti kužele s vrcholovým úhlem  $70,4^\circ$  otevřeným okolo osy sondy. Tento úhel odpovídá maximální intenzitě turbulence 15 %. [3]



Obrázek 15: Tříosá sonda [3]

#### Sonda s děleným vláknem na tři části

Sonda s děleným vláknem na tři části je používána při měření dvourozměrných proudových toků. Tato sonda povoluje náběh proudu v celém rozsahu, tedy úhel mezi vektorem rychlosti proudu a osou sondy může být v až  $\pm 180^\circ$ . [3]

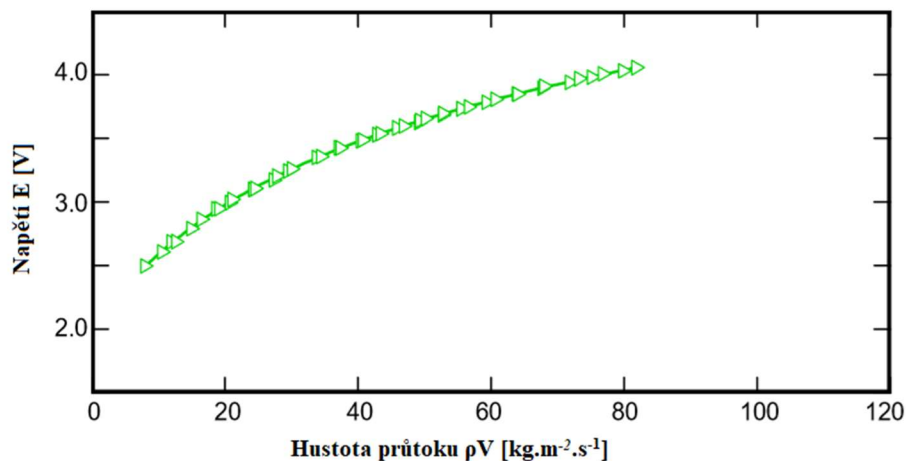
### **3. Kalibrace sondy**

Pro připravovaný experiment bude použita sonda s děleným vláknem. Z tohoto důvodu bude následný popis odpovídat kalibraci pro měření právě touto sondou.

#### **3.1. Rychlostní kalibrace**

Termo-anemometrická sonda je kalibrována pomocí volného proudění vzduchu vystupujícího z dýzy. Sonda je umístěna v zařízení, tak, aby byla zajištěna konstantní vzdálenost od dýzy a zároveň byla možnost natáčení sondy v rozsahu  $\pm 90^\circ$  od axiálního směru.

Rychlostní kalibrace je pro sondy s děleným vláknem a pro sondy s celistvým vláknem prakticky identická. Typická kalibrační křivka rychlosti pro jeden senzor je zobrazena na obrázku 16. Zde můžeme vidět závislost napětí  $E$  [V] (měřeného na senzoru) na hustotě průtoku  $\rho V$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ]. Kalibrační křivka je složena z množství kalibračních bodů. Je to právě tato křivka, která se používá při vyhodnocování měření pro převod naměřených napětí na hodnoty rychlostí (nebo hodnoty hustot průtoků). [2, 4]



Obrázek 16: Typická rychlostní kalibrační křivka [2]

Obvykle tato křivka odpovídá Kingově zákonu, ve tvaru:

$$E = A + B(\rho V)^n \quad [2]$$

### 3.1.1. Kingův zákon

Tento zákon je odvozen z tepelné bilance vyhřívané sondy za nucené konvekce. Ve výše uvedeném vzorci je  $E$  napětí naměřené sondou. Exponent  $n$  je 0,5 za předpokladu kalibrace pro nekonečně dlouhý válec a příčný průtok. Pro krátké ohřáté vlákno a následné tepelné ztráty způsobené vodícími hroty (naš experimentální případ) je hodnota exponentu obvykle snížena na 0,45. Konstanta  $A$  je vypočtena jako  $A = E_0^2$ , přičemž  $E_0$  je napětí při nulové rychlosti proudění, které lze snadno naměřit.

V tomto okamžiku je, pro určení konstanty  $B$  nutné mít vykreslenou závislost  $E=f(U)$ , kde  $U$  je rychlost vstupního proudění v m/s a  $E$  je tomu odpovídající napětí naměřené sondou. Po zvolení exponentu  $n = 0,45$  již snadno pomocí charakteristiky určíme hodnotu konstanty  $B$ . [1]

Zde však nastává problém v tom, že při nulové rychlosti proudění není přenos tepla ze sondy vyvozen nucenou, ale volnou konvekcí. Důsledkem toho je napětí naměřené sondou při nulové rychlosti vyšší, než by bylo nucenou konvekcí za nulového průtoku. Konstanta  $A$  je tedy následně určena extrapolací dat nucené konvekce na nulovou rychlost. Prvních několik hodnot konstanty  $B$  je určeno za použití výše zmíněného vzorce  $A = E_0^2$  a charakteristiky  $E = f(U)$ . Poté je určena hodnota optimalizační funkce (z anglického: merit function), která se rovná součtu čtverců odchylek mezi naměřenými a použitými hodnotami pro každou hodnotu  $\rho V$  použitou během kalibrace (napětí naměřené a vypočtené kingovým zákonem se nebude 100 % shodovat). Vzhledem k tomu, že nezávislá proměnná pro tuto optimalizační funkci je hodnota  $A$ , tak budeme její hodnotu snižovat, dokud optimalizační funkce nedosáhne svého minima. [2]

Kingův zákon je založen na dvou fyzikálních jevech: proudění a přenos tepla. Lze tedy předpokládat, že převod rychlosti proudění na napětí je dostatečně přesný minimálně v rozsahu, ve kterém byla prováděna kalibrace. [2]



### 3.1.2. Polynom čtvrtého řádu

Tato metoda byla zavedena teprve v nedávné době a je založena na přizpůsobení kalibračních dat do rovnice 4. řádu:

$$E = C_0 + C_1(\rho V) + C_2(\rho V)^2 + C_3(\rho V)^3 + C_4(\rho V)^4 \quad [2]$$

Tento polynom je čistě matematickou definicí, bez jakýchkoli fyzikálních základů. Z tohoto důvodu je jeho platnost omezena pouze na oblast kalibrovaných dat. Mimo tuto oblast může polynom velmi rychle dosáhnout nereálných hodnot. [2]

Při použití tohoto polynomu by však bylo potřeba počítat velké množství rovnic čtvrtého řádu, a i přes to, že je vše počítáno pomocí speciálních programů, by to vyžadovalo nepřiměřeně dlouhý výpočetní čas. Proto je používána inverzní forma tohoto polynomu:

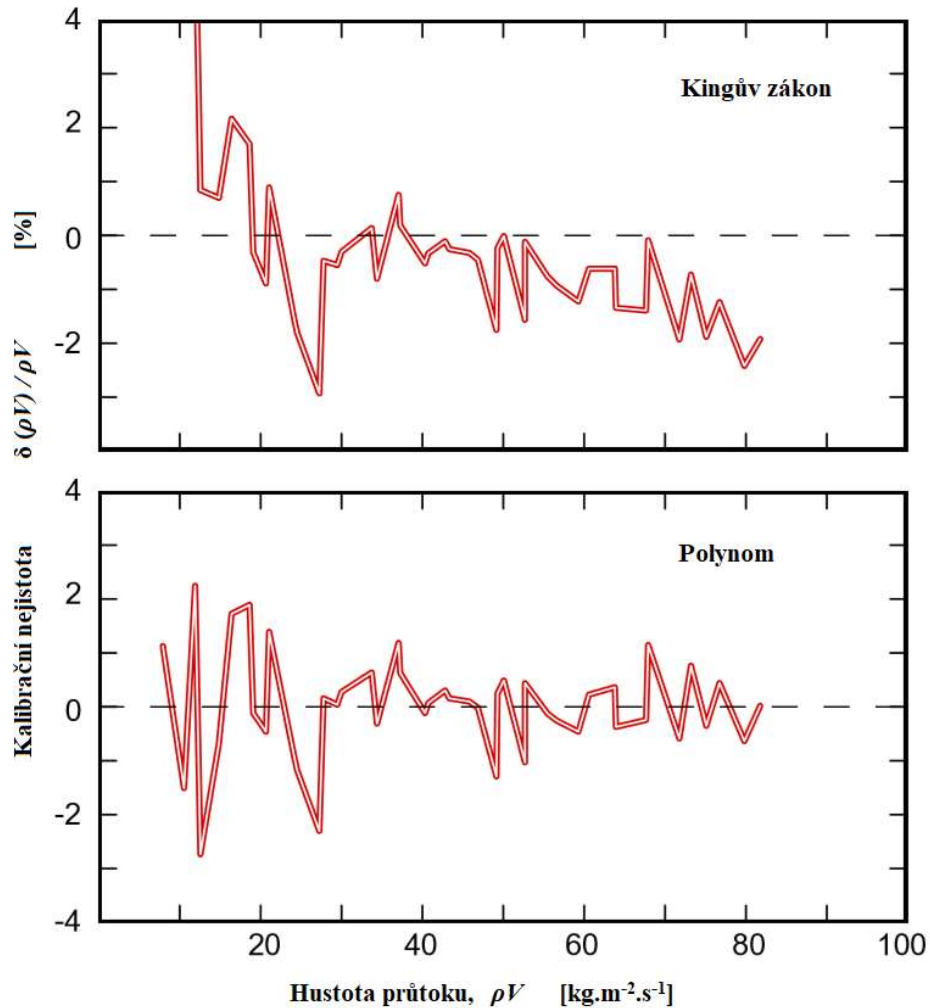
$$\rho V = D_0 + D_1E + D_2E^2 + D_3E^3 + D_4E^4 \quad [2]$$

Vzhledem k tomu, že kalibrační křivka většinou neobsahuje více než 40 bodů, zkracuje inverzní forma polynomu výpočetní čas na podobnou dobu, jako trvá samotné vyhodnocení kalibračních dat. [2]

### 3.1.3. Porovnání Kingova zákona s polynomem čtvrtého řádu

V roce 2004 bylo v NASA provedeno porovnání těchto dvou kalibračních metod, při příležitosti měření proudění právě sondou s děleným vláknem. Porovnání bylo realizováno za účelem zjistit, která metoda je přesnější, a tedy vhodnější pro kalibraci. [2]

Při porovnání byla použita kalibrační data, jako simulovaná testovací data. V ideálním případě by výsledkem měly být přesně hodnoty  $\rho V$  kalibračních bodů. Zde je třeba podotknout, že v průběhu kalibračního procesu bylo prováděno vždy 5 různých měření napětí, pro každou jednu hodnotu  $\rho V$ . Těchto 5 měření bylo následně zprůměrováno a pomocí průměrné hodnoty byla odečtena hodnota  $\rho V$  z kalibrační křivky (obrázek č.16). Tyto hodnoty  $\rho V$  byly porovnány se skutečnými hodnotami, při kterých byla kalibrace prováděna. Výsledek ve formě odchylek mezi přepočtenými hodnotami a vstupními hodnotami byl znázorněn do grafu (obrázek č.17). [2]



Obrázek 17: Porovnání Kingova zákona a polynomu 4. stupně [2]

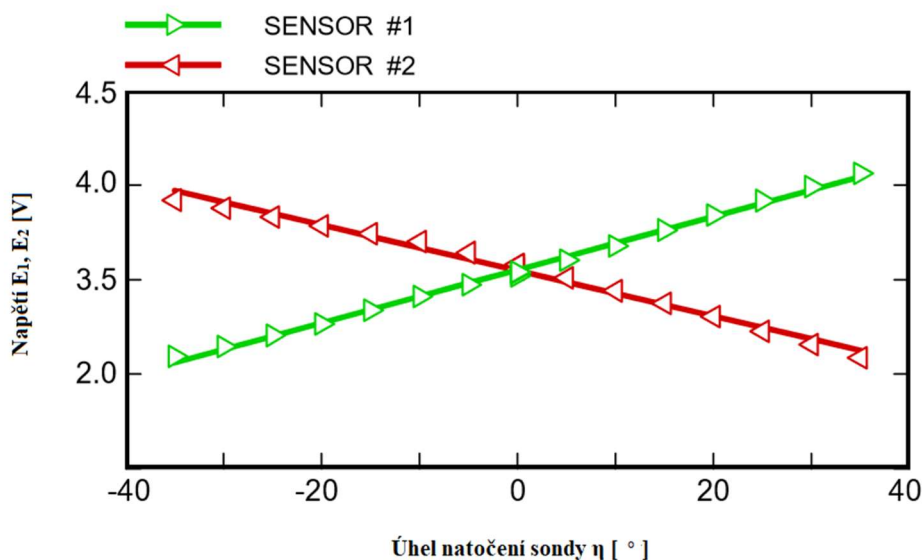
Výsledky ukázaly, že při použití Kingova zákona byly odchylky větší a navíc při nízké hodnotě  $\rho V$  byly spíše kladné a s rostoucí  $\rho V$  se odchylky pohybovaly v záporných číslech. U polynomu čtvrtého stupně byly menší odchylky a navíc oscilovaly téměř rovnoměrně okolo nulové osy. Z tohoto důvodu byl ve studiích NASA použit výhradně tento polynom. [2]

### 3.2. Kalibrace směru proudění

Kalibrace směru proudění se (na rozdíl od kalibrace rychlosti) provádí pouze pro sondy s děleným vláknem, či větším množstvím senzorů. Pro jednodílné sondy se snímacím válcem kolmým na rovinu proudění kalibrace směru nemá význam z toho důvodu, že tyto sondy nejsou citlivé na změnu směru

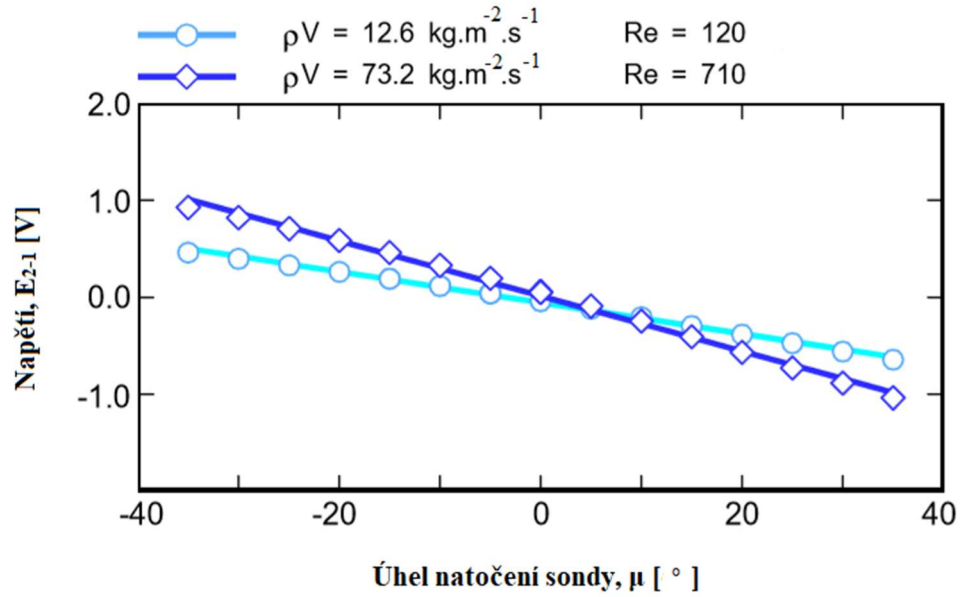
proudění až do doby, než začne proudění interferovat s hroty, což odpovídá zhruba natočení  $\pm 90^\circ$ . [2, 5]

Rychlostní charakteristika sond s dělenými vlákny je lineární, alespoň v rozsahu úhlů  $\pm 40^\circ$ . Ačkoli směrová charakteristika při daném průtoku, tedy dané hodnotě Reynoldsova čísla (počítaného pro průměr potrubí) je lineární, tak její sklon závisí do jisté míry na průtokovém Reynoldsově čísle (počítaného pro průměr sondy), které závisí na hodnotě  $\rho V$  daného proudění. Za předpokladu, že vektor rychlosti proudění leží v rovině kolmé k ose sondy a sondou lze otáčet o úhel natočení pak vypadá typická směrová charakteristika pro sondu s děleným vláknem následovně:



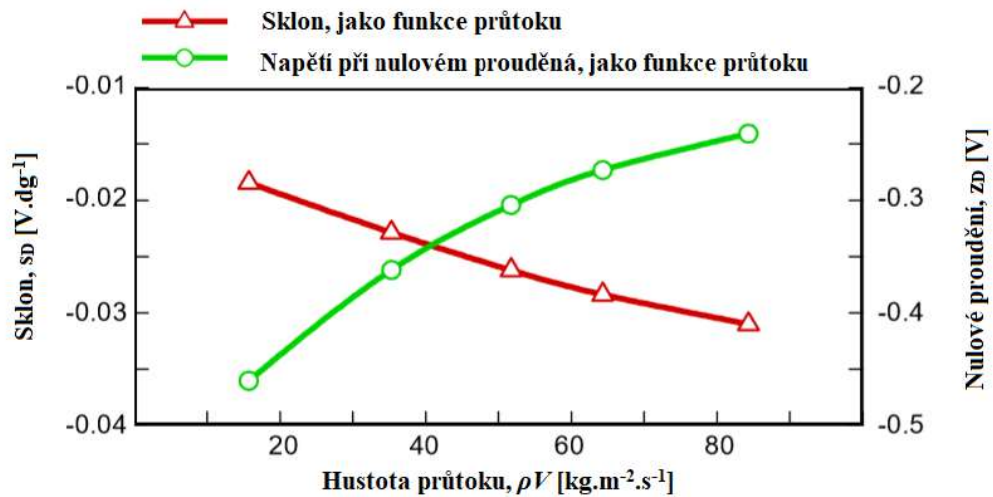
Obrázek 18: Směrová charakteristika sondy s děleným vláknem při hustotě průtoku  $\rho V = 58,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $Re = 570$ ) [5]

Na obrázku 19 je zachycena diferenciální směrová charakteristika pro dvě hodnoty hustoty průtoku: pro  $\rho V = 12,6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $Re = 120$ ) a pro  $\rho V = 73,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $Re = 710$ ). Ta udává rozdíl mezi signálovým napětím čidla 1 a napětím čidla 2, jako funkci úhlu dopadu proudění na sondu. [2, 5]



Obrázek 19: Diferenciální směrová charakteristika sondy s děleným vláknem [5]

Pro matematické zachycení této směrové mapy byly vytvořeny dvě funkce. První je charakteristický sklon, jako funkce průtoku  $\rho V$  a druhá je zbytkové napětí při nulovém proudění, také jako funkce  $\rho V$ . Obě tyto funkce jsou znázorněny na obrázku 20. [2, 5]



Obrázek 20: Sklon a napětí při nulovém proudění, jako funkce hustoty průtoku [2]

## 4. Vyhodnocení naměřených dat

Pro vyhodnocení naměřených dat jsou používány dva postupy. První (chronologicky starší) je iterační postup, který je založen na odhadu počáteční hodnoty  $\rho V(\xi = 0)$ , kde parametr  $\xi$  udává číslo iterace. Postup se pak aplikuje zvlášť pro každý jeden signál ze všech zaznamenaných dat. Druhý (novější) postup je založen na minimální hodnotě optimalizační funkce (z anglického: minimal value of merit function), která je tvořena pro celý rozsah hodnot  $\rho V$ , pro který byla sonda kalibrována. [2, 5]

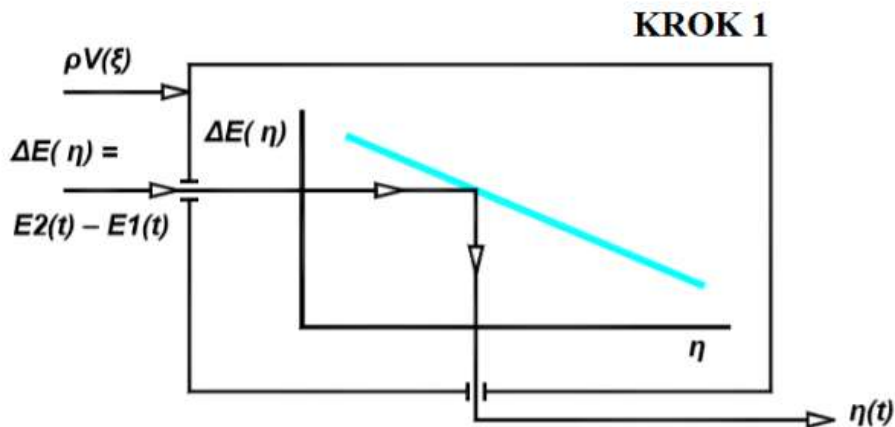
### 4.1. Iterační postup

Postup se skládá ze čtyř hlavních kroků:

#### Krok 1

Jako vstupy pro první krok iteračního postupu jsou napětí, naměřená na obou prvcích snímací sondy s děleným vláknem  $E1(t)$  a  $E2(t)$  a nejlepší možný odhad hodnoty hustoty průtoku  $\rho V(\xi = 0)$ . Tento odhad je založen buďto na hodnotách naměřených aerodynamickými sondami, nebo na teoretických počítačových modelech. [5]

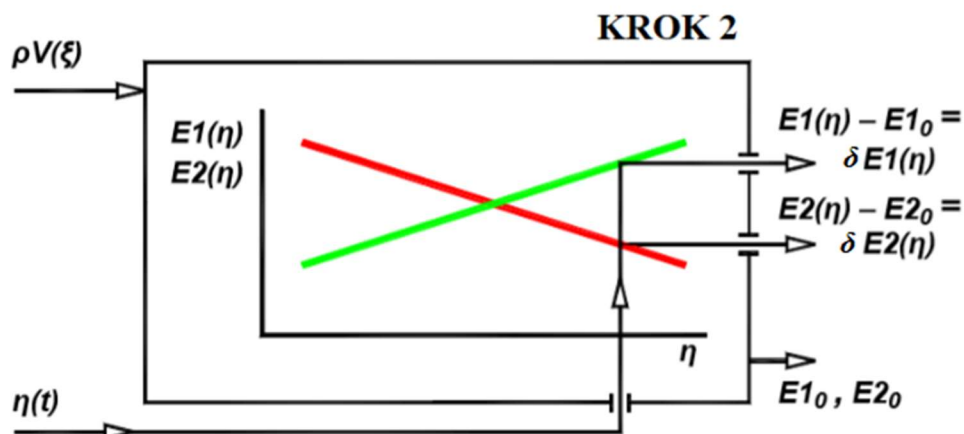
Takto zjištěné hodnoty se využijí pro určení úhlu dopadu proudění na sondu  $\eta(t)$ . Ten je odečten z diferenciální směrové charakteristiky (obrázek č.19) pro odhadovanou hodnotu hustoty průtoku  $\rho V(\xi)$  a rozdíl napětí  $\Delta E(t) = E2(t) - E1(t)$  (obrázek č.21). [5]



Obrázek 21: Iterační postup – schéma kroku 1 [5]

## Krok 2

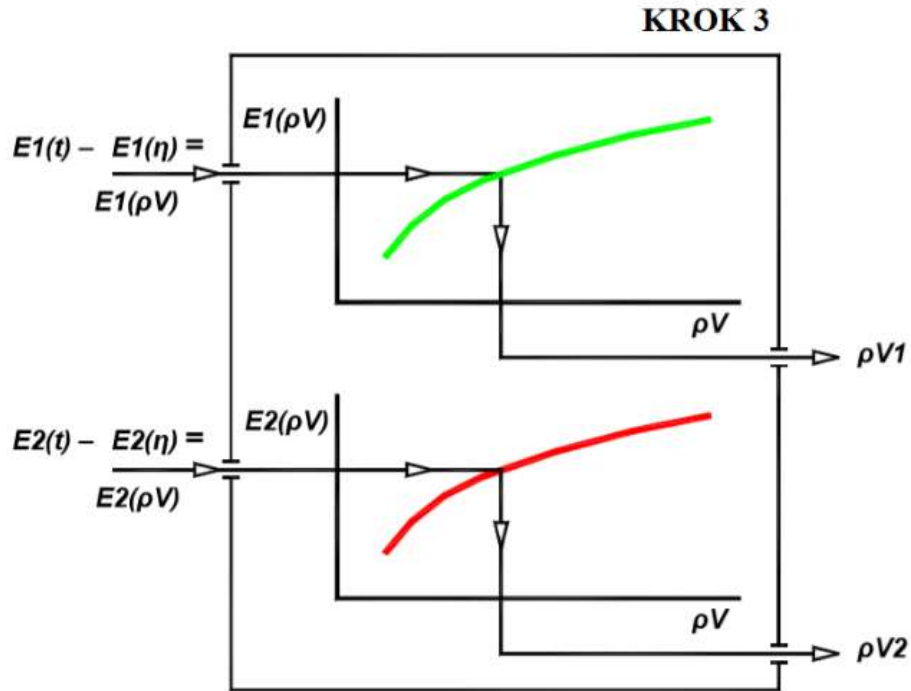
Ve druhém kroku jsou stanoveny odchylky napětí  $\delta E1(\eta)$  a  $\delta E2(\eta)$ . Ty jsou vypočteny podle vzorce:  $\delta E(\eta) = E(\eta) - E_0$ . Hodnoty napětí  $E1(\eta)$  a  $E2(\eta)$  jsou odečteny ze směrových charakteristik sondy (obrázek č.18) za pomoci úhlu dopadu proudění na sondu  $\eta(t)$  (získaného v kroku 1) a hodnoty hustoty průtoku  $\rho V(\xi)$ . Hodnoty napětí  $E1_0$  a  $E2_0$  jsou taktéž odečteny ze směrových charakteristik při hodnotě hustoty průtoku  $\rho V(\xi)$ , ale při nulovém úhlu dopadu ( $\eta = 0$ ) (obrázek č.22). [5]



Obrázek 22: Iterační postup – schéma kroku 2 [5]

## Krok 3

Ve třetím kroku jsou zkorigovány signálová napětí  $E1(t)$  a  $E2(t)$  o vliv úhlu dopadu proudění  $\eta(t)$ . To je provedeno tak, že se od těchto naměřených hodnot napětí odečtou odchylky  $\delta E1(\eta)$  a  $\delta E2(\eta)$  stanovené v kroku 2. Tím dostáváme hodnoty napětí  $E1(\eta_0)$  a  $E2(\eta_0)$ , pomocí kterých jsou určeny z rychlostních charakteristik jednotlivých senzorů (obrázek č.16) hodnoty hustot průtoku  $\rho V1$  a  $\rho V2$  (obrázek č.23). [5]

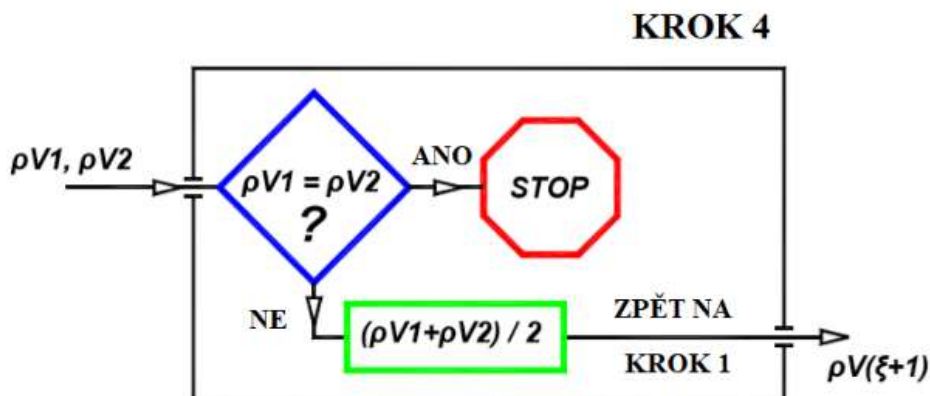


Obrázek 23: Iterační postup – schéma kroku 3 [5]

#### Krok 4

Ve čtvrtém, posledním kroku jsou porovnány hodnoty hustot průtoků  $\rho V1$  a  $\rho V2$ . Pokud se tyto dvě hodnoty neshodují a jejich rozdíl je větší, než předepsaná tolerance, je vypočtena jejich průměrná hodnota  $\rho V(\xi + 1)$ . Tato hodnota je následně použita jako nová počáteční hodnota hustoty průtoky pro krok 1 a celý postup prováděn od začátku. [5]

Iterační postup se opakuje až do doby, kdy jsou hodnoty  $\rho V1$  a  $\rho V2$ , shodné, nebo se liší maximálně o hodnotu povolenou tolerancí. V tuto chvíli se iterační proces zastaví a hodnoty úhlu dopadu  $\eta(t)$  a hustoty průtoky  $\rho V(\xi)$  pro časový okamžik  $t$  jsou považovány za výsledné. Stejný iterační postup je pak aplikován na následující časový okamžik až do doby, kdy jsou určeny výsledné hodnoty pro celé měřené spektrum (obrázek č.24). [5]



Obrázek 14: Iterační postup – schéma kroku 4 [5]

Tento iterační postup funguje dobře v ustáleném, nebo mírně nestabilním proudění. Nicméně u více nestabilního proudění s velkými výkyvy rychlosti a směru se tento postup aplikuje velice těžko. Toleranční pole hustoty průtoku musí být zvyšováno až na takovou hodnotu, kdy se výsledné  $\rho V$  zásadně liší od hodnot naměřených konvekčními aerodynamickými sondami. Z tohoto důvodu byl zaveden druhý postup založený na minimální hodnotě funkce zásluh. [5]

## 4.2. Postup založený na minimální hodnotě optimalizační funkce

Z anglického: Process based on the minimum value of a merit function. Proces je založen na minimální hodnotě optimalizační funkce, která je vytvořena pro rozsah všech hustot průtoku  $\rho V$ , pro který byla sonda kalibrována. Pro vyhodnocení jsou zapotřebí pouze aktuálně měřená data a kalibrační křivky sondy, jež jsou popsány výše. Proces probíhá následujícím způsobem:

Nejprve je naměřeno napětí na čidle 1 a 2 –  $E_1$ ,  $E_2$  a je vypočten jejich rozdíl  $\Delta E_{2-1}$ . Následně pomocí tohoto rozdílu procedura zkoumá diferenciální směrové charakteristiky (obrázek č.19) získané při kalibraci. Z nich je určeno několik hodnot hustot průtoku  $\rho V$  a k nim příslušné úhly dopadu proudění na sondu. Následně se určí rozdíl  $E_2 - E_1$  z jednotlivých směrových charakteristik pro úhel dopadu a hodnotu  $\rho V$  (obrázek č.18). Hodnota optimalizační funkce je



vypočtena, jako čtverec rozdílu  $\Delta E_{2-1}$  a  $E_2-E_1$ . Konkrétní hodnota  $\rho V_M$ , pro kterou dosáhne optimalizační funkce svého minima je jedna ze tří hodnot hustot průtoku proudění potřebné v tomto procesu. Nyní, když je znám úhel dopadu proudění na sondu jsou upravena napětí vůči směrovým efektům a následně použita jako vstupy do rychlostních charakteristik obou senzorů pro určení hodnot  $\rho V_1$  a  $\rho V_2$  (obrázek č.16). [2]

Konkrétní hodnota hustoty průtoku je nakonec vypočtena, jako průměrná hodnota z  $\rho V_1$ ,  $\rho V_2$  a  $\rho V_M$ . Tyto tři hodnoty by v ideálním případě měly být shodné, nicméně reálně se liší. Obvykle rozdíl mezi nimi nepřekročí hranici 3 % jejich průměrné hodnoty. Pokud je pro nějaká data hodnota rozdílu vyšší než 3 %, jsou zkoušená data vyřazena. [2]

Tento postup je velmi rychlý. Pro představu vyhodnocení souboru dat o 160 000 záznamech trvá zhruba 90 s. [2]

## **5. Konstrukce držáku sondy a konektorové krabičky**

### **5.1. Konstrukce držáku sondy**

Držáky sondy jsou pro měření zapotřebí konstruovány dva. První je držák hlavní měřicí sondy, která je umístěna ve vrchní části měřicího zařízení. V tomto držáku je použita sonda s děleným vláknem 55R57 od výrobce DANTEC DYNAMICS. Samotná sonda je usazena v nástavci, který je společně s ní nakupován od stejného výrobce. Druhý držák je použit pro synchronizační sondu 55R02. Ten se od prvního liší pouze velikostí nástavce. Z důvodu optimalizace výroby jsou vyrobeny dva totožné držáky a rozdíl ve velikosti nástavce je kompenzován jednoduchou redukcí.

Držák sondy je zhotoven z pěti, nebo v případě synchronizační sondy ze šesti částí. První část je již zmiňovaný nástavec. Pro měřicí sondu je to nástavec 55H24 (obrázek č.25) a pro sondu synchronizační 55H20.



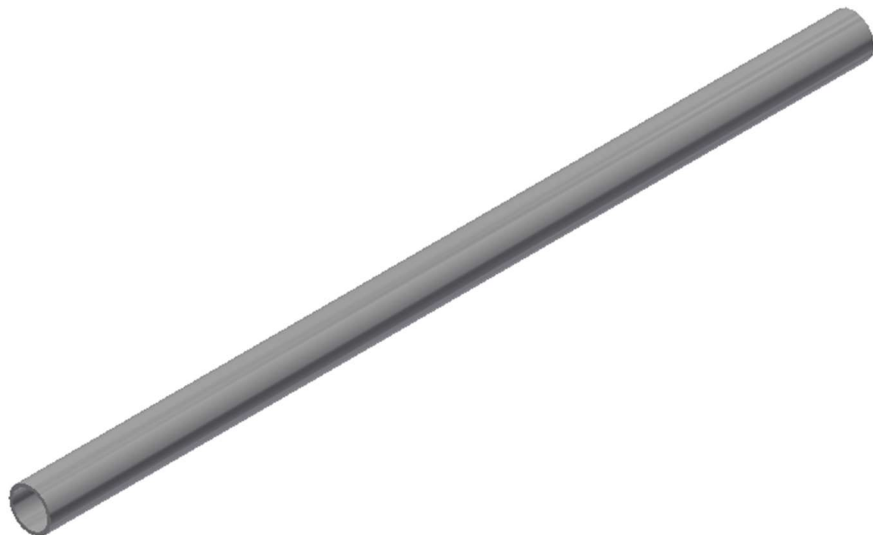
Obrázek 25: Nástavec 55H24

Nástavec pro synchronizační sondu 55H20 je vizuálně podobný, nicméně jeho zadní (užší) část má vnější průměr pouze 3 mm, oproti nástavci 55H24, kde je tento průměr 5 mm. Jak bylo již výše zmíněno, tento rozdíl je kompenzován jednoduchou redukcí, která má vnitřní průměr 3 mm a vnější 5 mm (obrázek č.26).



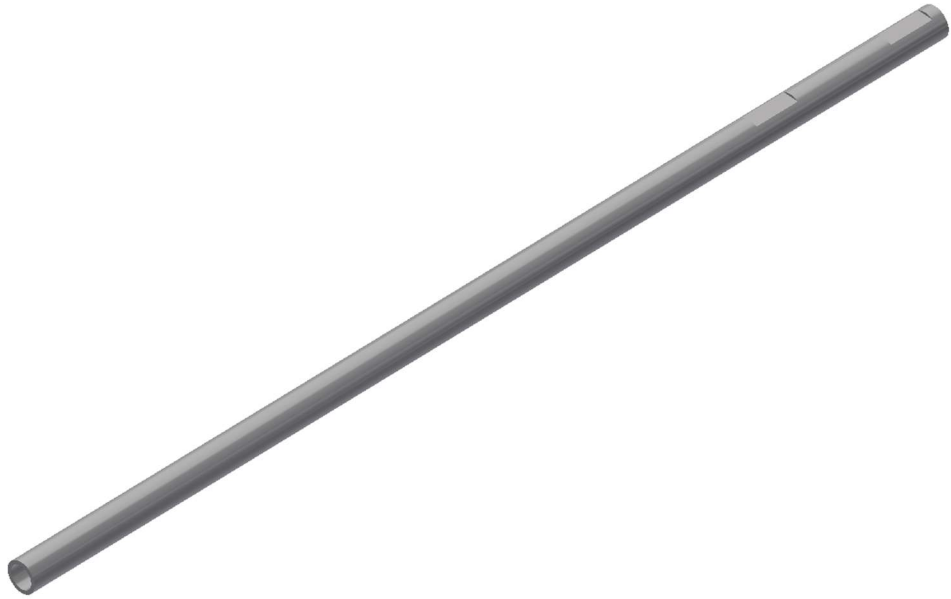
*Obrázek 26: Redukce pro nástavec 55H20*

Třetí část držáku je trubka, do které je nasunut nástavec se sondou, případně i s redukcí. Tato trubka má vnější průměr 6 mm a vnitřní průměr 5 mm (obrázek č.27).



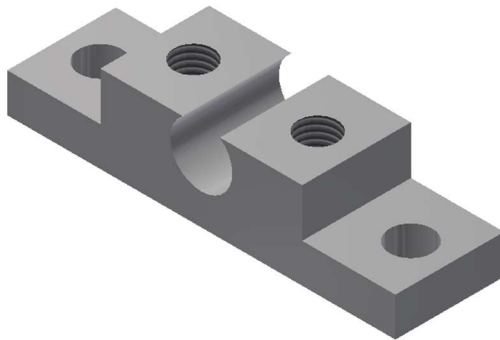
*Obrázek 27: Trubka nástavce sondy*

Čtvrtým dílem držáku je uchycovací trubka s vnitřním průměrem 6 mm a vnějším průměrem 8 mm. Tato trubka je opatřena dvěma stejnými drážkami. Jedna slouží k uchycení držáku ke konstrukci měřícího zařízení a zároveň k pojištění samovolného pootočení sondy. Druhá drážka potom slouží k uchycení konektorové krabičky a zamezení jejímu samovolnému otáčení (obrázek č.28).

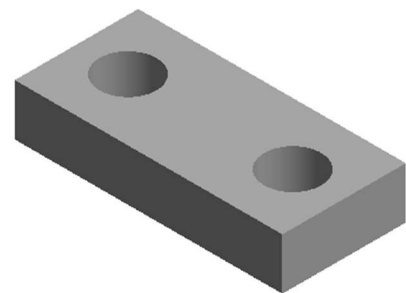


Obrázek 28: Uchycovací trubka

Posledními dvěma částmi jsou spodní a vrchní část uchycení, kterými je celý držák připevněn ke konstrukci měřícího zařízení. Ve spodní části je jeden otvor o vnějším průměru 8 mm, kterým vede výše zmíněná uchycovací trubka. Dále se v této části nachází dva otvory pro šrouby k upevnění na konstrukci měřícího zařízení a dva závitové otvory, které slouží pro přišroubování vrchní části (obrázky č. 29 a 30).



Obrázek 29: Spodní část uchycení držáku



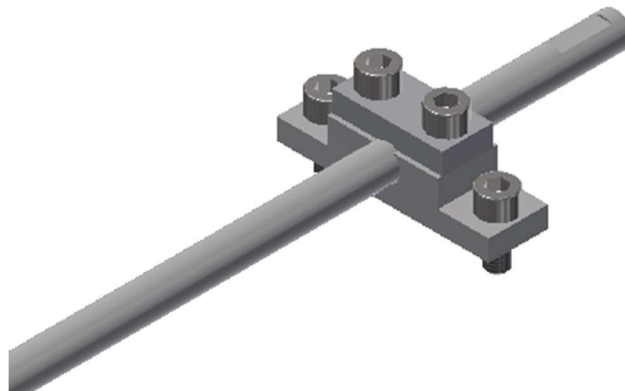
Obrázek 30: Vrchní část uchycení držáku

Držák je sestaven tak, že je na nástavec sondy nasunuta redukce a takto rozšířený nástavec se nasune do vodící trubky (v případě měřící sondy se nasune pouze nástavec). Následně je trubka s nástavcem nasunuta do hlavní, uchycovací trubky. Všechny části jsou k sobě lepeny (obrázek č.31).



Obrázek 31: Sestavené trubky

Uchycovací trubka je pak vsunuta do spodní části uchycení držáku, ke které je pomocí dvou šroubů připevněna horní část uchycení tak, že přesně zapadne do první drážky vyfrézované na trubce (obrázek č.32).



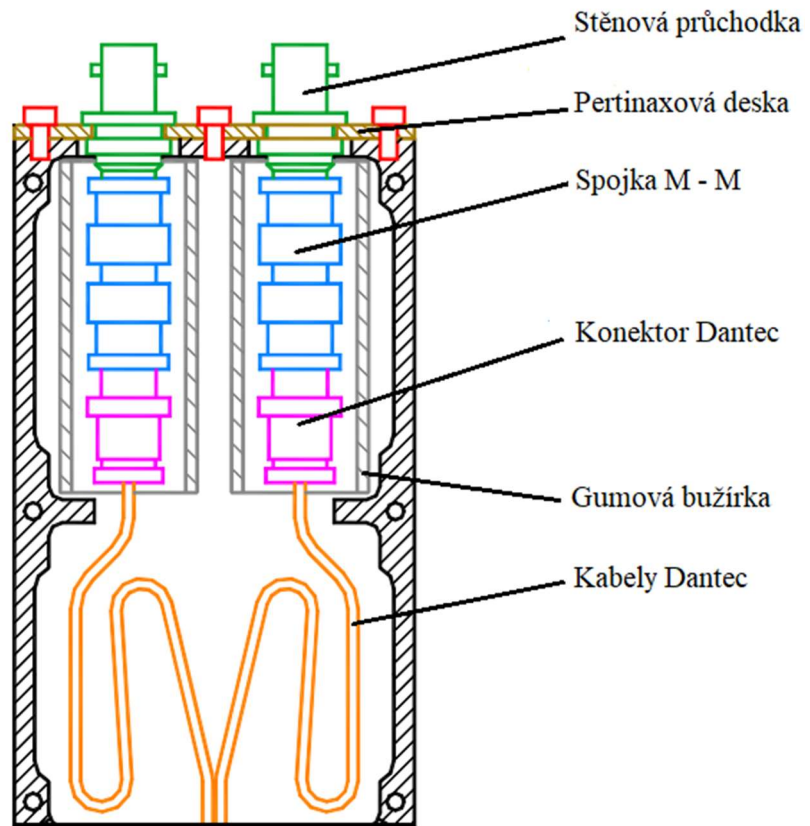
Obrázek 32: Připevnění uchycovací části k trubce

## 5.2. Konstrukce konektorové krabičky

Konektorová krabička slouží k uschování a ochraně kabelů vedoucích od sondy, k naprosté elektrické izolaci konektorů signálních kabelů a k jednoduchému a rychlému připojení signálních kabelů. V přední části krabičky jsou smotané přebytečné kabely zakončené konektory. Na ty je napojena M-M spojka (male – male), na kterou je v krabičce napojena stěnová průchodka. Izolace je zajištěna tím, že jsou konektory se spojkou a s částí stěnové průchodky,

Příprava experimentálního zařízení pro měření rychlosti ve válci termoanemometrickou sondou

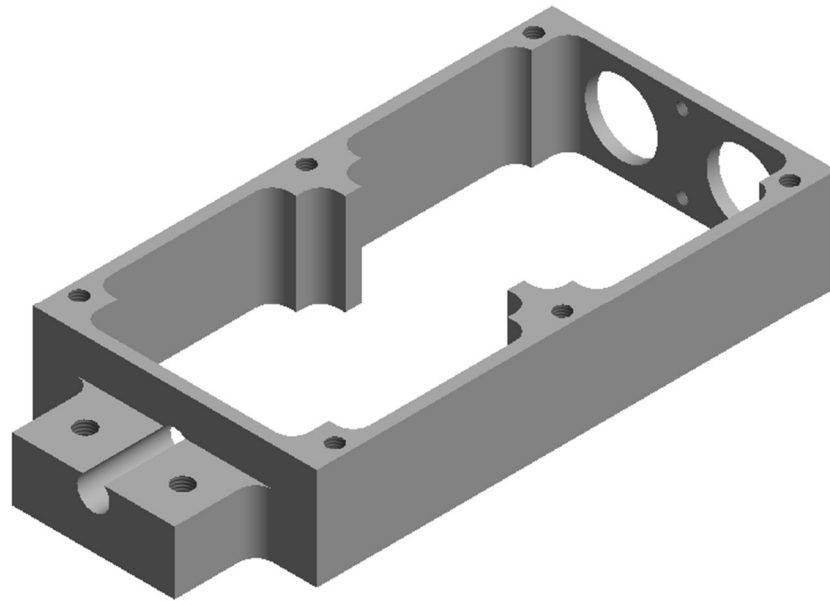
povlečeny gumovou, nevodivou bužírkou. Schéma konektorové krabičky je zobrazeno na obrázku číslo 33.



Obrázek 33: Schéma konektorové krabičky

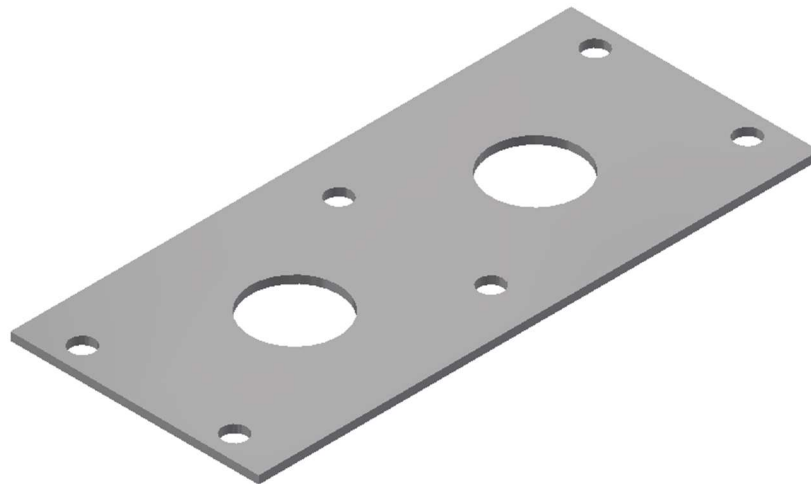
Krabička je sestavena celkem z pěti částí. Z hlavní části, dvou totožných vík, uchycovací destičky a zadní nevodivé desky.

Hlavní část krabičky (obrázek č.34) má z vrchu i ze spodu otvory se závity pro uchycení vík. V zadní stěně jsou zhotoveny dva otvory dostatečně velkého průměru sloužící k tomu, aby při zapojení nedošlo ke kontaktu krabičky a stěnové průchodky. V této, zadní části krabičky je taktéž zhotoveno šest děr se závity pro uchycení nevodivé, pertinaxové desky. Na čele krabičky je vyroben systém uchycení shodný se systémem u držáku sondy.



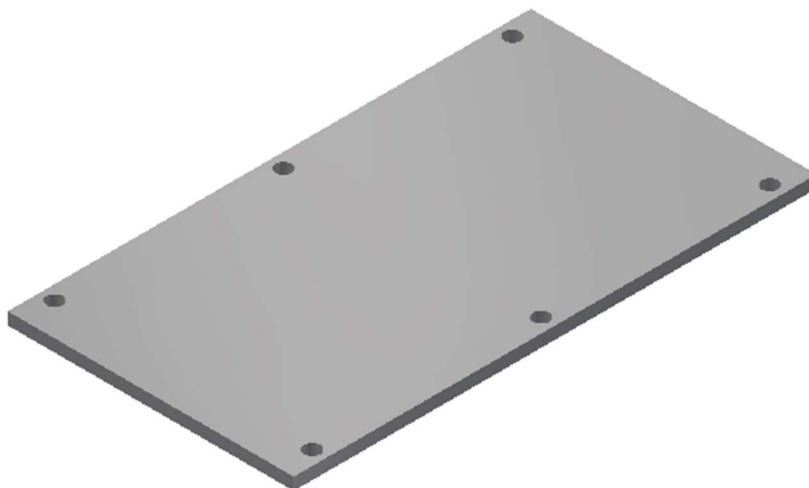
Obrázek 34: Hlavní část krabičky

K zadní části krabičky je přišroubována deska s dvěma otvory, které mají takový rozměr, aby se do nich daly uchytit stěnové průchodky. Z důvodu nevodivosti je tato deska vyrobena z pertinaxu. V desce je také zhotoveno šest otvorů sloužících k přišroubování desky k hlavní části krabičky (obrázek č.35).



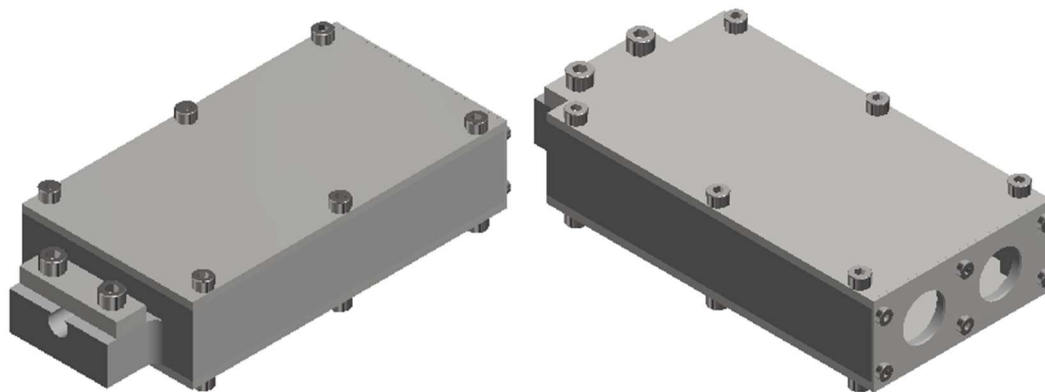
Obrázek 35: Pertinaxová deska

Krabička je z důvodu snadné montáže z obou stran uzavřena dvěma shodnými víky. Víka jsou taktéž opatřena šesti otvory sloužícími k přišroubování k hlavní části krabičky (obrázek č.36).



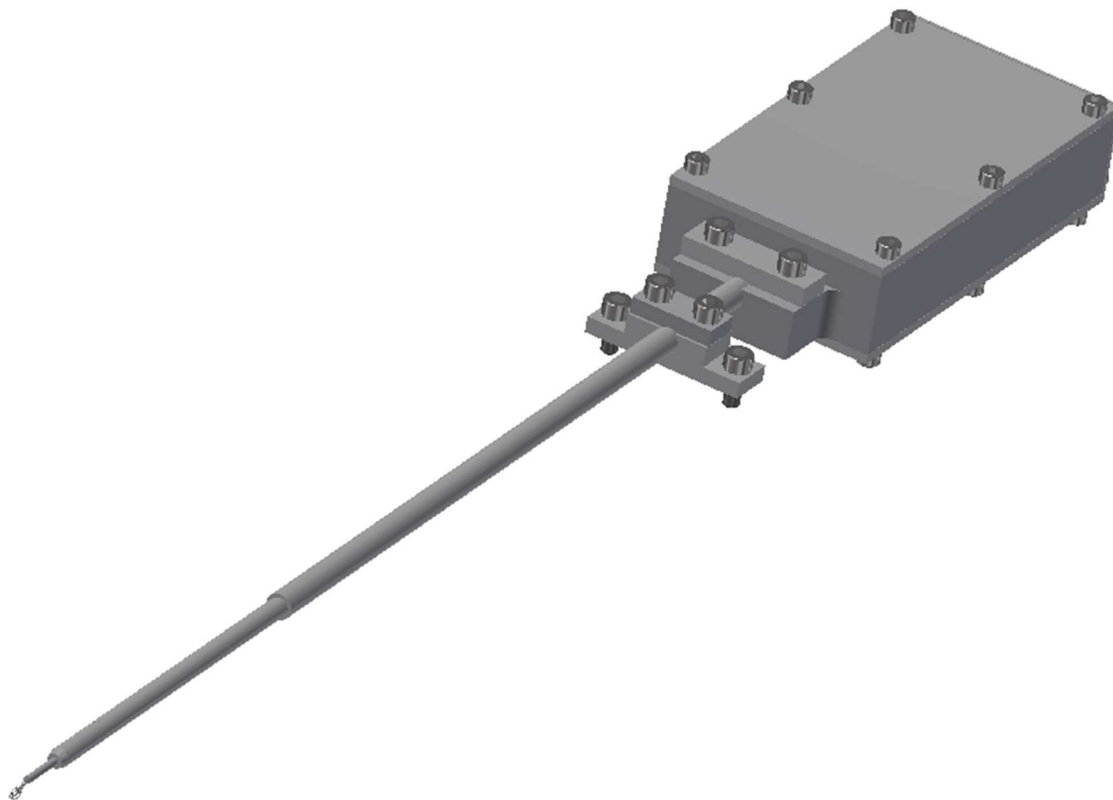
Obrázek 36: Víko

Celá sestavená krabička (obrázek č. 37) je připevněna k uchycovací trubce stejným způsobem, jako je držák sondy připevněn ke konstrukci měřícího zařízení, tedy pomocí drážky v trubce, destičky a dvou šroubů. Sestavení držáku sondy a konektorové krabičky je zobrazeno na obrázku číslo 38.



Obrázek 37: Konektorová krabička





*Obrázek 28: Sestavení držáku sondy a konektorové krabičky*

## **Seznam použité literatury**

- [1] JØRGENSEN Finn. How to measure turbulence with hot-wire anemometers – a partical guide. [online]. 2005, [cit. 2019-04-23]  
Dostupné z: <http://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/hotwire2.pdf>
- [2] LEPIČOVSKÝ Jan. Measurment With a Split-Fiber Probe in Complex Unsteady Flows. 2004, [cit. 2019-04-23]
- [3] Probes for Hot-wire Anemometry. Dantec Dynamics. [online]. 2017 [cit. 2019-04-23] Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/docs/products-and-services/fluid-mechanics/cta/Probe%20cat%202017.pdf>
- [4] URBA Václav. Anemometrie – žhavené senzory. [online], [cit. 2019-04-23]  
Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/HW/PA.pdf>
- [5] LEPIČOVSKÝ Jan. Application of a Split-fiber Probe to Velocity Measurment in the NASA Research Compressor. 2003, [cit. 2019-04-23]
- [6] Miniature X wire probe, straight. Dantec Dynamics. [online]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/miniature-x-wire-probe-straight>
- [7] Triple-sensor Gold-plated Wire Probe. Dantec Dynamics. [online]. [cit 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/products-and-services/triple-sensor-gold-plated-wire-probe>
- [8] Single-sensor Fiber-film Probes. Dantec Dynamics. [online]. [cit 2019-04-23] Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/products-and-services/single-sensor-fiber-film-probes>
- [9] Hot wire probe. [online]. [cit 2019-04-23] Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hot\\_wire.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hot_wire.JPG)
- [10] Anemometer hot-wire probe. [online]. [cit 2019-04-23]. Dostupné z: <http://www.auspexscientific.com/astronomy.html>
- [11] BUTTERFIELD Graeme R. Application of thermal anemometry and high-frequency measurment of mass flux to aeolian sediment transport research. [online]. 1999, [cit 2019-04-23]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99000057>
- [12] Hatschbach P., Lepičovský J.: Test Facility for In-Cylinder Unsteady Velocity Measurement Using Hot-Wire Probe, In: Scientific Proceeding KOKA 2019. Lednice: Mendel University in Brno, 2019, v tisku. [cit 2019-07-02]

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Měřicí zařízení [12].....	10
Obrázek 2: Řez měřicím zařízením [12].....	11
Obrázek 3: Typický HWA měřicí řetězec [1] .....	12
Obrázek 4: Jednoduchá sonda s miniaturním drátkem [3] .....	16
Obrázek 5: X-sonda s miniaturním drátkem [6].....	16
Obrázek 6: Jednorozměrná sonda s pozlaceným drátkem [3] .....	17
Obrázek 7: Tri-axiální sonda s pozlaceným drátkem [7] .....	17
Obrázek 8: Vláknový senzor s filmem [3].....	18
Obrázek 9: Detail senzoru s rozměry [8].....	18
Obrázek 10: Sonda s děleným vláknem [2].....	19
Obrázek 11: Filmová sonda [3] .....	19
Obrázek 12: Normální sonda s jedním drátkem [9] .....	20
Obrázek 13: Šikmá sonda s jedním drátkem [10].....	21
Obrázek 14: Dvou-senzorová sonda - provedení do X [11].....	21
Obrázek 15: Tříosá sonda [3] .....	22
Obrázek 16: Typická rychlostní kalibrační křivka [2].....	23
Obrázek 17: Porovnání Kingova zákona a polynomu 4. stupně [2].....	26
Obrázek 18: Směrová charakteristika sondy s děleným vláknem při hustotě průtoku $\rho V = 58,8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ( $\text{Re} = 570$ ) [5].....	27
Obrázek 19: Diferenciální směrová charakteristika sondy s děleným vláknem [5] .....	28
Obrázek 20: Sklon a napětí při nulovém proudění, jako funkce hustoty průtoku [2].....	28
Obrázek 21: Iterační postup - schéma kroku 1 [5] .....	29
Obrázek 22: Iterační postup - schéma kroku 2 [5] .....	30
Obrázek 23: Iterační postup - schéma kroku 3 [5] .....	31
Obrázek 24: Iterační postup - schéma kroku 4 [5] .....	32
Obrázek 25: Nástavec 55H24 .....	34
Obrázek 26: Redukce pro nástavec 55H20.....	35
Obrázek 27: Trubka nástavce sondy.....	35
Obrázek 28: Uchycovací trubka .....	36
Obrázek 29: Spodní část uchycení držáku.....	36

Obrázek 30: Vrchní část uchycení držáku .....	36
Obrázek 31: Sestavené trubky .....	37
Obrázek 32: Připevnění uchycovací části k trubce.....	37
Obrázek 33: Schéma konektorové krabičky .....	37
Obrázek 34: Hlavní část krabičky .....	39
Obrázek 35: Pertinaxová deska .....	32
Obrázek 36: Víko.....	40
Obrázek 37: Konektorová krabička .....	40
Obrázek 38: Sestavení držáku sondy a konektorové krabičky .....	41

## **Seznam tabulek**

Tabulka 1: Použití sond podle měřeného média a typu průtoku .....	13
---	----