

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Experimentální měření na vzduchovém tunelu pro výzkum axiálních těles

Autor: **David Tupý**  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**  
Konzultant práce: **Ing. Robert Kalista**

Akademický rok 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David TUPÝ**

Osobní číslo: **S14B0282P**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**

Název tématu: **Experimentální měření na vzduchovém tunelu pro výzkum axiálních těles**

Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem práce je navrhnout metodiku experimentálního určení tlakové ztráty na modelu axiálního tělesa parní turbíny a provést vlastní měření ve vybraných režimech a konfiguracích na existujícím zařízení na zkušebně Škoda Doosan Power.

#### Máte za úkol:

1. Na experimentálním modelu pro výzkum axiálních těles osazeném na výstupu z aerodynamického vzduchového tunelu provést experimentální měření za účelem zjištění tlakových ztrát.
2. Provést kalibraci měřicích přístrojů a experimentální model osadit měřicí aparaturou.
3. Zpracovat rozbor nejistot měření jednotlivých veličin a součinitele tlakové ztráty.
4. Podle možností provádět experimentální měření s různými vestavbami a tvary axiálního tělesa.
5. Výsledky porovnat formou tabulek a grafů, pro vybraný stroj přepočítat změnu ztrátových součinitelů na ztracený nebo získaný výkon.

Rozsah grafických prací: -  
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

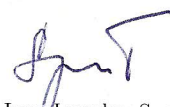
- Bečvář J.: Tepelné turbíny, SNTL Praha, 1968
- Idel'čik I. J.: Handbook of hydraulic resistences, 3rd edition, Jaico publishing house 2008
- Manual of Ansys Fluent ve verzi využívané na ZČU

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**  
Katedra energetických strojů a zařízení  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Robert Kalista**  
Doosan Škoda Power

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2016**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2017**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Dr. Ing. Jaroslav Synáč  
vedoucí katedry


V Plzni dne 3. října 2016

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: 30. 5. 2017

  
.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této bakalářské práce prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc. a konzultantu Ing. Robertu Kalistovi za poskytnuté konzultace, materiály a odborné rady, bez kterých by tato práce nemohla být realizována.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Tupý	Jméno David	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	B2301 R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Uruba, CSc.	Jméno Václav	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se škrtněte
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Experimentální měření na vzduchovém tunelu pro výzkum axiálních těles		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

**POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)**

<b>CELKEM</b>	76	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	76	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Tato práce se věnuje experimentálnímu měření ztrátového součinitele výstupního axiálního tělesa. Měření je prováděno na aerodynamickém tunelu. První část práce se zabývá teorií difuzorů. Dále je popsána metodika měření ztrátového součinitele a měřicí aparatura s ohledem na nejistoty měření. Rozebrány jsou potřebné vztahy pro vyhodnocení primárních dat. Na závěr jsou uvedeny výsledky získané experimentálním měřením.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA</b></p> <p style="text-align: center;"><b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p style="text-align: center;">experimentální měření, axiální výstupní těleso, aerodynamický tunel, měřicí aparatura, nejistota měření, ztrátový součinitel</p>

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Tupý	Name David	
<b>FIELD OF STUDY</b>	B2301 R016 „Design of Power Machines and Equipment“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Uruba, CSc.	Name Václav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKE		
<b>TYPE OF WORK</b>	<del>DIPLOMA</del>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Experimental measurement of the axial exhaust hood with use of an air wind tunnel		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2017
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	76	<b>TEXT PART</b>	76	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The thesis deals with experimental measurement of an axial exhaust hood loss coefficient. Measurement is conducted in a wind tunnel. The first part is focused on theoretical aspects of diffusers. Further in the thesis, methods of measurement of the loss coefficient and the measuring equipment are described with respect to measuring uncertainties. Relations needed for an evaluation of primary data are analysed. The results obtained from the experimental measurement are stated in the final part of the thesis.
<b>KEY WORDS</b>	experimental measurement, axial exhaust hood, wind tunnel, measuring equipment, uncertainty of measurement, loss coefficient

## Obsah

1	Úvod.....	11
2	Základní teorie difuzorů a jejich dělení.....	12
2.1	Definice difuzoru.....	12
2.2	Dělení difuzorů.....	12
2.2.1	Tepelné difuzory.....	12
2.2.2	Mechanické difuzory.....	12
2.2.3	Difuzory s měnícím se průtočným množstvím.....	13
2.2.4	Geometrické difuzory.....	13
2.3	Rozměrové veličiny geometrických difuzorů.....	13
2.3.1	Ploché a konické difuzory.....	13
2.3.2	Kuželové difuzory.....	14
2.3.3	Difuzory se zakřivenými stěnami.....	15
2.3.4	Rovnice pro výpočty difuzorových proudění.....	15
2.3.5	Machovo číslo.....	15
2.3.6	Hugoniotův teorém.....	16
3	Podzvukové difuzory.....	17
3.1	Charakteristika podzvukových difuzorů.....	17
3.2	Termodynamické děje v difuzorech.....	17
3.2.1	Vliv tvaru geometrie difuzoru na ztráty.....	21
3.2.2	Vliv Reynoldsova čísla na ztráty v difuzoru.....	22
3.2.3	Rychlostní pole na vstupu do difuzoru.....	22
3.2.4	Možnosti snížení ztrát.....	23
3.3	Mezní vrstva.....	23
3.3.1	Charakteristika mezní vrstvy.....	23
3.3.2	Proudění v mezní vrstvě.....	24
3.3.3	Reynoldsovo číslo.....	25
3.3.4	Charakteristické tloušťky mezní vrstvy.....	25
3.3.5	Održení mezní vrstvy.....	25
3.3.6	Separáčn <b>í</b> bublina.....	27
4	Výstupní hrdla.....	28
5	Zkušební zařízení.....	30
6	Nejistoty měření.....	32
6.1	Zdroje nejistot.....	32
6.2	Typy nejistot.....	32



6.3	Nejistota typu A.....	33
6.4	Nejistota typu B.....	34
6.5	Standardní kombinovaná nejistota.....	34
6.6	Rozšířená nejistota.....	35
7	Kalibrace.....	36
7.1	Kalibrace měřicího zařízení.....	36
7.2	Kalibrace Pt100.....	36
7.3	Teorie vyjádření shody se specifikací.....	37
7.4	Nejistota měření etalonu a kalibrovaného přístroje.....	37
8	Měření teplot.....	39
8.1	Plášťový odporový teploměr – Pt100.....	39
8.1.1	Nejistota měření – Pt100.....	40
8.2	Termoelektrické články.....	41
8.2.1	Nejistota měření – termočlánek typu K.....	43
9	Měření tlaku.....	45
9.1	Rosemount.....	45
9.1.1	Nejistota měření – absolutní tlak.....	46
9.1.2	Rosemount 3051S.....	49
9.2	NetScanner 9116.....	50
10	Popis experimentálního měření.....	52
10.1	Měřicí schéma.....	52
10.2	Zapojení měřicích členů.....	53
11	Zpracování naměřených dat.....	54
11.1	Vyhodnocení naměřených dat v rovině před lopatkovou mříží.....	54
11.2	Statistické zpracování naměřených hodnot.....	54
11.3	Výpočet ztrátového součinitele.....	55
11.3.1	Nejistota měření ztrátových součinitelů typu B.....	56
11.4	Výpočet rychlosti v rovině 1.....	57
11.5	Výpočet Machova čísla.....	58
12	Postup měření.....	59
12.1	Odběry tlaků.....	59
12.2	Sběr experimentálních dat.....	59
13	Výsledky experimentálního měření.....	60
13.1	Statistické zpracování dat – kontrola normality.....	60
13.1.1	Histogram.....	60

13.1.2	Quantile – quantile plot (Q-Q plot) .....	61
13.2	Výsledky teplotní kalibrace .....	61
13.3	Nejistoty měření.....	62
13.3.1	Odhad nejistoty měření teploty .....	62
13.3.2	Odhad nejistoty měření absolutního tlaku.....	64
13.3.3	Odhad nejistoty měření relativního tlaku .....	64
13.3.4	Odhad nejistoty měření ztrátového součinitele $\zeta_{1-3}$ .....	66
13.4	Vyhodnocení měření .....	66
13.4.1	Axiální těleso s lopatkovou mříží.....	66
13.4.2	Axiální těleso bez lopatkové mříže .....	67
13.5	Ověření předpokladu.....	69
13.6	Získaný výkon.....	72
13.6.1	Vliv ztrátového součinitele na získaný výkon.....	72
14	Závěr.....	73
15	Literatura .....	74
16	Seznam obrázků .....	76
17	Seznam tabulek .....	78

## Použité symboly a zkratky

$A_j$	[-]	koeficient citlivosti
$A, B, C$	[-]	teplotní koeficient
$c$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost
$c_p$	[-]	součinitel zvýšení tlaku
$D, d$	[m]	průměr
$h, H$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	entalpie
$i$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	entalpie
$k$	[-]	korekční koeficient
$k_r$	[-]	koeficient rozšíření
$L, l$	[m]	délka
$Ma$	[-]	Machovo číslo
$\dot{m}$	$[\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}]$	průtočné množství
$n$	[-]	bezrozměrné rozevření difuzoru
$p$	[Pa]	tlak
$p_c, p_s, p_d, p_{bar}$	[Pa]	tlak celkový, statický, dynamický, barometrický
$p$	[-]	hodnota pravděpodobnosti
$p_p$	[-]	poměr dynamických tlaků
$P$	[W]	výkon
$q$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}]$	měrné teplo
$r$	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	univerzální plynová konstanta
$R, r$	[m]	poloměr
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$R_t$	$[\Omega]$	elektrický odpor
$s$	[-]	směrodatná odchylka
$S$	$[\text{m}^2]$	plocha
$t$	$[\text{°C}]$	teplota
$T$	[K]	termodynamická teplota
$v$	$[\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}]$	měrný objem
$c_{ax}$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	axiální výstupní rychlost
$w$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	rychlost
$x, y, z$	[m]	kartézské souřadnice
$\alpha$	$[\text{°}]$	úhel rozevření difuzoru
$\delta$	[m]	tloušťka mezní vrstvy
$\Delta$	[-]	přírůstek
$\eta$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}]$	dynamická vazkost
$\eta_{td}$	[-]	termodynamická účinnost
$\kappa$	[-]	Poissonova konstanta
$\vartheta$	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$	kinematická viskozita
$\rho$	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$	hustota
$\zeta$	[-]	ztrátový součinitel
$\zeta_m$	[-]	ztrátový součinitel mříže
URL		„Upper range limit“ – horní mez rozsahu
LRL		„Lower range limit“ – dolní mez rozsahu
$u_A, u_B, u_C$		standardní nejistota měření
$U_A, U_B, U_C$		rozšířená nejistota měření
$\delta$		složka nejistoty

# 1 Úvod

Výstupní těleso je důležitou součástí turbostroje. Pomocí výstupního tělesa je zajištěn odvod páry z posledního stupně turbíny do kondenzátoru. Dalším úkolem tělesa je zvýšit entalpický spád posledního stupně. Díky tomu dojde k navýšení výkonu turbíny, respektive termodynamické účinnosti. V současné době se klade velký důraz na zvyšování účinnosti elektráren. Je to způsobeno především rostoucími cenami paliva. Aby nárůst účinnosti byl co nejvyšší, je zapotřebí minimalizovat energetické ztráty, které vznikají na výstupu z lopatkové mříže posledního stupně turbíny. Na energetické ztráty má vliv tvarování difuzoru, velikost a tvar samotného tělesa, velikost a rozmístění vnitřních výztuh a podobně. Vhodná konstrukce tělesa napomáhá oddálit, případně eliminovat vznik odtržení mezní vrstvy. Právě odtržení mezní vrstvy je doprovázeno velkými energetickými ztrátami. Výstupní tělesa se dělí podle tvaru, respektive podle směru proudění páry na axiální, radiální, axiálně-radiální nebo diagonální.

Tato práce se zabývá axiálním výstupním tělesem, které se s výhodou využívá u menších turbín řádově do výkonu 180 MW. Výhodou, v porovnání s radiálními tělesy, je obecně jednodušší tvar, tedy i konstrukce, a s tím spojené také nižší energetické ztráty. Nevýhodou je prodloužení ložiskové vzdálenosti, což má nepříznivý vliv na rotodynamiku. Proto jsou axiální výstupy častější především u menších turbín, kde ložisková vzdálenost není obecně tak velká.

Výstupní tělesa jsou části značných rozměrů v porovnání s ostatními částmi turbíny. Na tato tělesa působí značný vnější přetlak. Přetlak je způsoben tím, že v kondenzátoru je neustále udržováno hluboké vakuum řádově 5-12 kPa. U axiálních těles vzniká mimo jiné problém se statickou tuhostí ložiskového stojanu. Z těchto důvodů je nezbytné vyrábět tělesa s různými výztuhami, které se podílejí na zvýšení pevnosti. Výztuhy se u axiálních těles umísťují především v dolní polovině tělesa. Zmiňované vnitřní prvky tvoří překážky v proudu páry a zpravidla mají nepříznivý vliv na tlakové ztráty. Vhodnou volbou tvaru, velikosti i konfigurace vnitřních výztuh lze nicméně tyto ztráty výrazně snížit. Docílit lze i zrovnoměnění rychlostního pole na výstupu z hrdla, což je užitečné z hlediska nepříznivých vibrací trubkových svazků v kondenzátoru. Pro návrh vhodného tvaru výstupního tělesa se dnes s výhodou využívají především numerické metody. I přes stále se zdokonalující výpočetní techniku a metodiku výpočtů není možné plně postihnout reálný stav. Numerické metody se tak stále často potýkají s mnoha zjednodušeními, a vždy je tak žádoucí je doplnit vhodným experimentem sloužícím k vzájemné validaci výsledků.

Cílem této práce je navrhnout metodiku experimentálního určení tlakové ztráty na modelu axiálního tělesa parní turbíny a provést vlastní měření na existujícím zařízení v experimentální laboratoři společnosti Doosan Škoda Power s. r. o.

Práce se na úvod zabývá rozdělením difuzorů. Pozornost je dále věnována pouze podzvukovým difuzorům, respektive axiálním výstupním tělesům. Detailněji jsou rozepsány a odvozeny energetické ztráty společně s jevy, které mají zásadní vliv na jejich velikost. Součástí práce je také rozbor nejistot měření. Výpočty nejistot jsou aplikovány na použitou měřicí aparaturu a jejich zapojení do měřicích řetězců. Následuje popis metodiky měření a popis zpracování naměřených dat, doplněný o použité výpočetní vztahy. Na závěr jsou shrnuty výsledky formou tabulek a grafů získané během experimentálního měření.

## 2 Základní teorie difuzorů a jejich dělení

### 2.1 Definice difuzoru

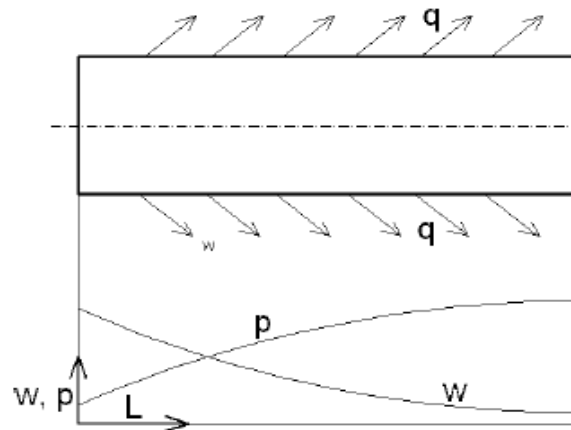
Difuzor je zařízení sloužící k přeměně kinetické energie proudu na energii potenciální. U správně navrženého difuzoru tak dochází ve směru proudění k nárůstu statického tlaku.

### 2.2 Dělení difuzorů

Difuzory je možné rozdělit na čtyři základní typy, a to tepelné, mechanické, s měnícím se průtočným množstvím a geometrické [5].

#### 2.2.1 Tepelné difuzory

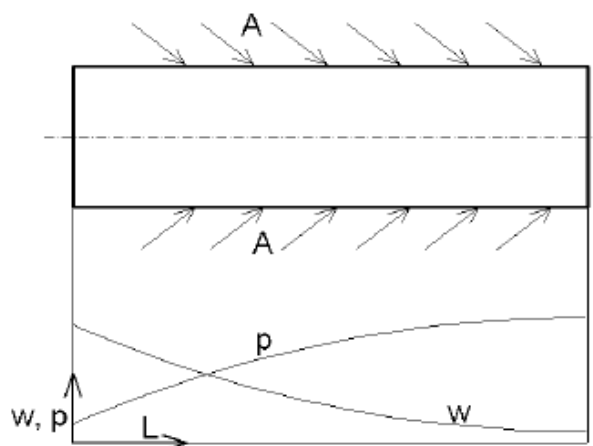
Tepelné difuzory je možné vyrábět s konstantním průřezem, jelikož ke zvyšování tlaku dochází odebráním tepla z kanálu, viz obr. 2-1. Tyto difuzory jsou nejčastěji využívány v letectví u plynových turbín proudových motorů.



Obr. 2-1: Tepelný difuzor [5]

#### 2.2.2 Mechanické difuzory

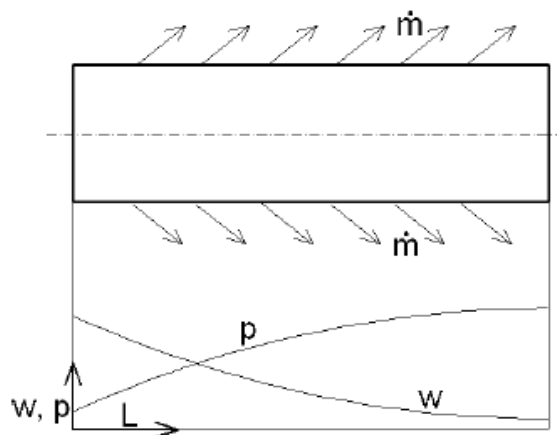
Mechanické difuzory se velmi často používají v kombinaci s geometrickými difuzory v kompresorovém stupni, viz obr. 2-2.



Obr. 2-2: Mechanické difuzory [5]

### 2.2.3 Difuzory s měnicím se průtočným množstvím

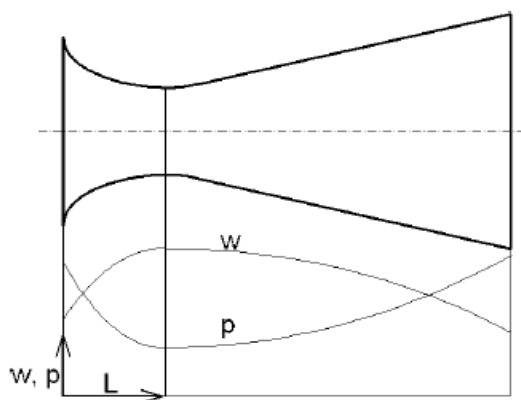
Z názvu je patrné, že se jedná o difuzory, které pracují na principu změny průtočného množství. Průtočné množství se snižuje ve směru proudění média, tím dochází ke zvyšování potenciální energie na úkor energie kinetické, viz obr. 2-3.



Obr. 2-3: Difuzor s měnicím se průtočným množstvím [5]

### 2.2.4 Geometrické difuzory

Geometrické difuzory mohou být podzvukové i nadzvukové. Podle Hugoniotova teorému, viz kap. 2.3.6, vyhovuje podzvukovému proudění jiný tvar difuzoru než nadzvukovému proudění. Jestliže ve směru proudění dochází ke zvětšování průřezu, jedná se o difuzory s podzvukovým prouděním, viz obr. 2-4. Tyto difuzory se velmi často využívají v energetice (například výstupní hrdla nebo regulační ventily).

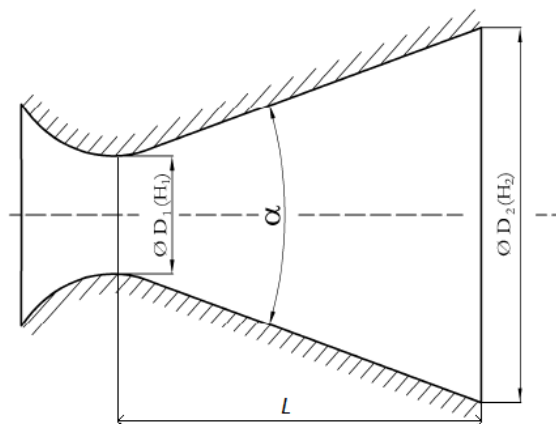


Obr. 2-4: Geometrický difuzor [5]

## 2.3 Rozměrové veličiny geometrických difuzorů

### 2.3.1 Ploché a konické difuzory

Difuzory tohoto typu jsou popsány čtyřmi základními geometrickými veličinami, viz obr. 2-5:  $D_1$  na vstupu (pro ploché difuzory rozměr  $H_1$ ),  $D_2$  na výstupu (pro ploché difuzory rozměr  $H_2$ ), délka  $L$ , úhel rozevření  $\alpha$ .



Obr. 2-5: Základní parametry konického (plochého) difuzoru [5]

Poměr vstupního a výstupního průřezu lze u geometrických difuzorů definovat jako tzv. bezrozměrné rozevření difuzoru  $n$ :

$$n = \frac{D_2^2}{D_1^2}, \quad (1)$$

pro plochý difuzor platí zjednodušený vztah:

$$n = \frac{H_2}{H_1}. \quad (2)$$

Z výše uvedených veličin jsou vždy tři nezávislé a je možné mezi nimi stanovit geometrickou vazbu:

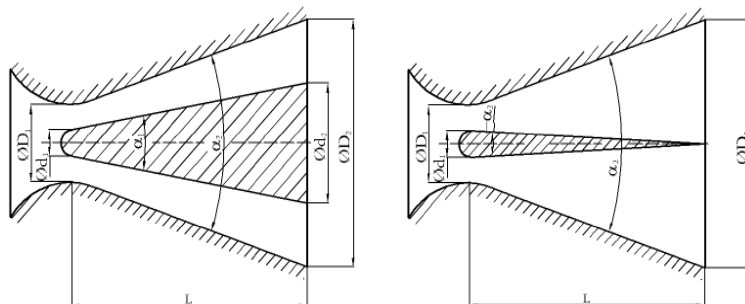
$$\sqrt{n} = 1 + 2 \cdot \frac{L}{D_1} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (3)$$

pro plochý difuzor platí:

$$n = 1 + 2 \cdot \frac{L}{H_1} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}. \quad (4)$$

### 2.3.2 Kuželové difuzory

Kuželové difuzory se zhotovují ve dvou provedeních, viz obr. 2-6. Oba typy jsou popsány následujícími veličinami:  $D_1, D_2, d_1, d_2, L, \alpha_1, \alpha_2$ , z nichž vždy čtyři jsou nezávislé.

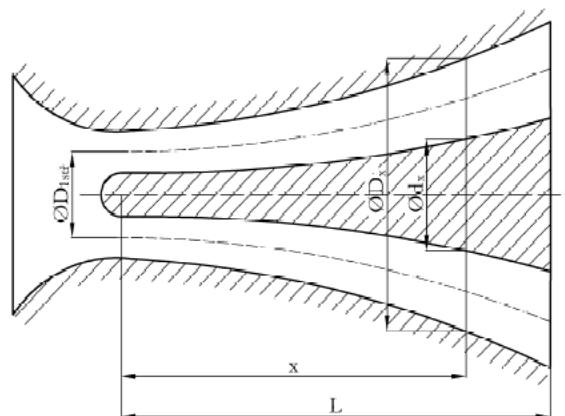


Obr. 2-6: Základní parametry kuželového difuzoru [5]

### 2.3.3 Difuzory se zakřivenými stěnami

Difuzor se zakřivenými stěnami, viz obr. 2-7, je možné definovat například následujícími parametry:

$$d_x = f'(x), D_x = f(x), L, x, D_{1stř.}$$



Obr. 2-7: Základní parametry difuzoru se zakřivenými stěnami [5]

### 2.3.4 Rovnice pro výpočty difuzorových proudění

Proudící tekutinu popisují stavové parametry, jedná se o hustotu  $\rho$ , tlak  $p$ , teplotu  $T$  a rychlost  $w$ . Aby mohly být určeny stavové parametry, je zapotřebí mít stejný počet rovnic. Rovnice lze následně řešit jako soustavu. Tyto rovnice jsou označovány jako tzv. základní rovnice mechaniky tekutin (termomechaniky) [11]:

- 1) rovnice zachování hmotnosti  $\equiv$  rovnice spojitosti (kontinuity) pro proudovou trubici

$$\frac{\partial(\rho S_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho S_k w_k)}{\partial k} = 0, \quad (5)$$

- 2) rovnice zachování hybnosti  $\equiv$  rovnice Navier-Stokesova

$$\frac{\partial w_i}{\partial t} + w_k \frac{\partial w_i}{\partial k} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial i} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right), \quad (6)$$

- 3) rovnice zachování energie  $\equiv$  rovnice energetická

$$\frac{dh}{dt} - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dt} = R_i - \frac{1}{\rho} \frac{dp}{di} + \nu \frac{\partial^2 w_i}{\partial k^2} + \frac{1}{3} \nu \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial w_k}{\partial k} \right), \quad (7)$$

- 4) stavová rovnice (pouze v případě, že jako proudící médium je uvažován ideální plyn)

$$\frac{p}{\rho} = rT. \quad (8)$$

### 2.3.5 Machovo číslo

Machovo číslo je jedno z tzv. podobnostních čísel, tedy charakteristická bezrozměrná fyzikální veličina využívaná v aerodynamice. Udává poměr rychlosti pohybu tělesa nebo rychlosti proudění určitým prostředím k rychlosti šíření zvuku v témže prostředí:



$$Ma = \frac{w}{a}, \quad (9)$$

$$a = \sqrt{\kappa \cdot r \cdot T}. \quad (10)$$

### 2.3.6 Hugoniotův teorém

Hugoniotův teorém určuje závislost mezi Machovým číslem a průtočným průřezem proudícího plynu. Hugoniotův teorém lze odvodit z rovnic (5) a (7):

$$\frac{dw}{w}(1 - Ma^2) + \frac{dS}{S} = 0. \quad (11)$$

Vztah (11) popisuje, že změna rychlosti proudění a průtočného průřezu závisí na Machově čísle následovně:

- 1)  $w < a \Leftrightarrow Ma < 1 \Rightarrow (1 - Ma^2) > 0 \Rightarrow dS < 0$   
- podzvukové proudění; při zvětšování průřezu difuzoru dochází k poklesu rychlosti,
- 2)  $w > a \Leftrightarrow Ma > 1 \Rightarrow (1 - Ma^2) < 0 \Rightarrow dS > 0$   
- nadzvukové proudění; při zmenšování průřezu difuzoru dochází k poklesu rychlosti,
- 3)  $w = a \Leftrightarrow Ma = 1 \Rightarrow (1 - Ma^2) = 0 \Rightarrow dS = 0$   
- zvukové proudění; rychlost zvuku dosažena v kritickém (nejužším) průřezu difuzoru.

Další teorie se bude věnovat geometrickým difuzorům pracujícím v podzvukovém proudění.

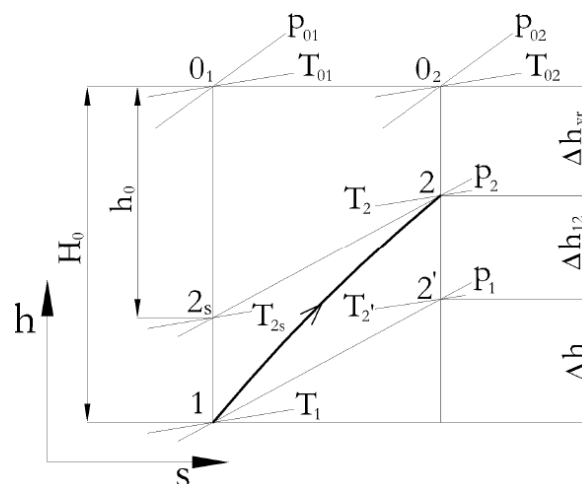
### 3 Podzvukové difuzory

#### 3.1 Charakteristika podzvukových difuzorů

Podzvukové difuzory (dále označovány jako difuzory) patří mezi nejpoužívanější kanály (trubice), které se využívají v oborech, kde se uplatňuje teorie proudění tekutin. Jak již bylo zmíněno, difuzor je zařízení sloužící k přeměně kinetické energie proudu na energii potenciální. Při této změně vždy dochází ke vzniku ztrát. Děj je možné uskutečnit při podzvukových rychlostech v trubici, jejíž průřez se směrem k výstupu zvětšuje. Přeměna kinetické energie na potenciální vždy úzce souvisí se samotným tvarováním stěn trubice. Při zvyšujícím se tlaku tekutiny podél kanálu může při nevyhovujících tvarových podmínkách dojít k odtržení tekutiny v mezní vrstvě, což způsobí vznik oblastí neurovnanného, rozvířeného a zpětného proudění. Toto proudění je nežádoucí. Dochází při něm k velkým energetickým ztrátám, které jsou větší než samotné ztráty vlivem tření tekutiny o obtékanou stěnu kanálu v mezní vrstvě. Hlavním úkolem je zabránit vzniku odtržených oblastí, nebo alespoň jejich minimalizace. Jedná se o nelehký úkol, k jehož řešení se využívá nejrůznějších podkladů a experimentálních měření [3].

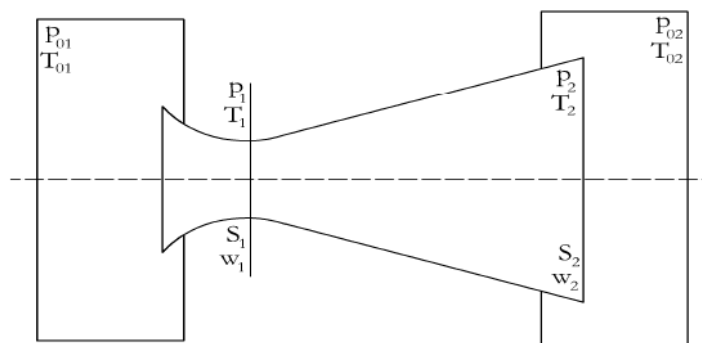
#### 3.2 Termodynamické děje v difuzorech

Termodynamické děje probíhající v podzvukovém difuzoru je možné popsat pomocí  $h - s$  diagramu, viz obr. 3-1.



Obr. 3-1:  $h - s$  diagram [5]

Bod  $0_1$  udává tzv. stagnační stav. Stagnační stav určuje celkový stav izoentropicky zastaveného proudu na vstupu do difuzoru. Bodem 1 se označují vstupní parametry média. Vzdálenost mezi body  $0_1$  a 1 představuje entalpický spád, který je v diagramu označen jako  $H_0$ . Entalpický spád je úměrný celkové kinetické energii vstupního proudu. Bod 2 udává statický stav na výstupu z difuzoru získaný po kompresi média. Bod  $0_2$  představuje stagnační stav výstupního proudu [9]. Entalpický spád  $\Delta h_{vr}$  je úměrný energii výstupní rychlosti. Jednotlivé body jsou zobrazeny, viz obr. 3-2.



Obr. 3-2: Označení bodů a řezů důležitých pro termodynamické děje [5]

Pokud není možné dále využít výstupní rychlost proudu, je nezbytné tuto kinetickou energii uvažovat jako ztrátu. V takovém případě lze definovat součinitel celkových ztrát  $\zeta_c$  vztahem:

$$\zeta_c = \frac{h_0}{H_0} = \zeta + \zeta_{vr}, \quad (12)$$

kde  $\zeta_{vr}$  je součinitel ztrát výstupní rychlosti:

$$\zeta_{vr} = \frac{\Delta h_{vr}}{H_0} \quad (13)$$

a  $\zeta$  je součinitel vnitřních ztrát celkové energie v difuzoru:

$$\zeta = \frac{\Delta h}{H_0}. \quad (14)$$

Součinitel celkových ztrát  $\zeta_c$  pro nestlačitelnou tekutinu se stanoví pomocí tlaků následujícím způsobem:

$$\zeta_c = \frac{p_{01} - p_2}{p_{01} - p_1} = \frac{p_{01} - p_2}{p_{d1}}, \quad (15)$$

kde  $p_{d1}$  představuje dynamický tlak na vstupu do difuzoru.

Součinitel celkových ztrát  $\zeta_c$  může být také odvozen pomocí 1. zákona termodynamiky pro adiabatický děj:

$$\begin{aligned} dq = 0 &= dh + d_{at} = dh - vdp, \\ dh &= vdp = \frac{1}{\rho} dp, \end{aligned} \quad (16)$$

pro nestlačitelnou tekutinu obecně platí  $\rho = konst$ ,

$$\zeta_c = \frac{h_{01} - h_{2s}}{h_{01} - h_1} = \frac{\frac{p_{01} - p_2}{\rho}}{\frac{p_{01} - p_1}{\rho}} = \frac{p_{01} - p_2}{p_{01} - p_1} = \frac{p_{01} - p_2}{p_{d1}}. \quad (17)$$

Transformace vstupní kinetické energie difuzoru  $H_0$  na energii tlakovou je určena podle vztahu:

$$\xi = \frac{\Delta h_{12}}{H_0}, \quad (18)$$

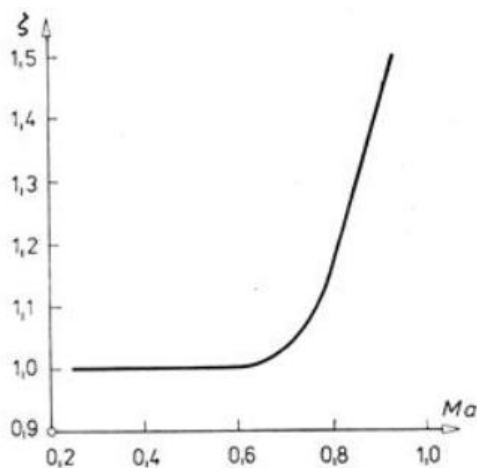
kde  $\Delta h_{12}$  udává velikost přeměněné energie. Pro nestlačitelnou tekutinu platí vztah stanovený pomocí tlaků:

$$\xi = \frac{p_2 - p_1}{p_{01} - p_1}. \quad (19)$$

Nyní lze vyjádřit energetickou rovnováhu v difuzoru pomocí vztahu:

$$1 = \xi + \zeta_{vr} + \zeta = \frac{\Delta h_{12}}{H_0} + \frac{\Delta h_{vr}}{H_0} + \frac{\Delta h}{H_0}. \quad (20)$$

Výše uvedené vztahy je možné využít pouze pro nízká Machova čísla do hodnoty  $0,7 Ma$ . Při vyšším  $Ma$  dochází k prudkému nárůstu ztrát, viz obr. 3-3, a vliv stlačitelnosti již nelze dále zanedbávat.



Obr. 3-3: Závislost ztrátového součinitele na Machovo čísle [3]

Ve společnosti DŠPW je zvyklostí vliv stlačitelnosti zanedbávat pouze do hodnoty  $0,4 Ma$ . Pro vyšší  $Ma$  lze součinitel celkových ztrát vyjádřit vztahem (23). Při jeho odvození se vychází z předpokladu proudění ideálního plynu:

$$dh = c_p dT, \quad (21)$$

$$pv^\kappa = konst, \quad (22)$$

kde pro ideální plyn platí  $c_p = konst$ . Poté je možné součinitel celkových ztrát vyjádřit vztahem:

$$\zeta_c = \frac{h_0}{H_0} = \frac{i_{01} - i_{2s}}{i_{01} - i_1} = \frac{c_p T_{01} - c_p T_{2s}}{c_p T_{01} - c_p T_1} = \frac{T_{01} - T_{2s}}{T_{01} - T_1} = \frac{1 - \frac{T_{2s}}{T_{01}}}{1 - \frac{T_1}{T_{01}}} = \frac{1 - \left(\frac{p_{2s}}{p_{01}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{1 - \left(\frac{p_1}{p_{01}}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \quad (23)$$

kde:

$\kappa$  - Poissonova konstanta (pro vzduch nabývá hodnoty 1,4).

Jak již bylo zmíněno, hlavním úkolem difuzoru je dílčí přeměna kinetické energie na energii tlakovou. S tímto souvisí další velmi důležitá veličina, tzv. tlakový součinitel  $c_p$ , který lze definovat vztahem:

$$c_p = \frac{p_2 - p_1}{p_{d1}}. \quad (24)$$

Tlakový součinitel  $c_p$  udává schopnost difuzoru přeměnit dynamický tlak vstupujícího proudu na energii tlakovou. Pokud se tlakový součinitel  $c_p = 1$ , mluví se o tzv. ideální hodnotě. V tomto případě se veškerý dynamický tlak vstupujícího proudu přeměnil na energii tlakovou. Této hodnoty není možné dosáhnout, neboť difuzor by musel při minimálních třecích ztrátách vykazovat neobyčejnou délku. V praxi je snaha dosáhnout co nevyšší hodnoty tlakového součinitele. Vždy ale závisí tato hodnota na konstrukčním provedení difuzoru. Vztah mezi tlakovým součinitelem a koeficientem celkových ztrát lze určit jako:

$$\zeta_c = \frac{p_{01} - p_2}{p_{d1}} = 1 - \frac{p_2 - p_1}{p_{d1}} = 1 - c_p. \quad (25)$$

V difuzoru mohou teoreticky nastat čtyři možnosti termodynamických dějů, viz obr. 3-4. Tyto možnosti vycházejí ze vztahu pro výpočet ztrátového součinitele (23). V případě, že se veškerá kinetická energie přemění na energii tlakovou, aniž by došlo k jakýmkoliv ztrátám, jedná se o tzv. izoentropické bezztrátové proudění (viz obr. 3-4 a)). Pro tento typ proudění platí [5]:

- $p_{01} = p_2 \rightarrow \zeta_c = 0$ .

Další mezní stav (viz obr. 3-4 c)) nastává, když:

- $p_{01} > p_2 = p_1 \rightarrow \zeta_c = 1$ .

V tomto případě nedochází při průchodu proudu difuzorem k žádnému stlačení, respektive je veškerá získaná energie ztracena.

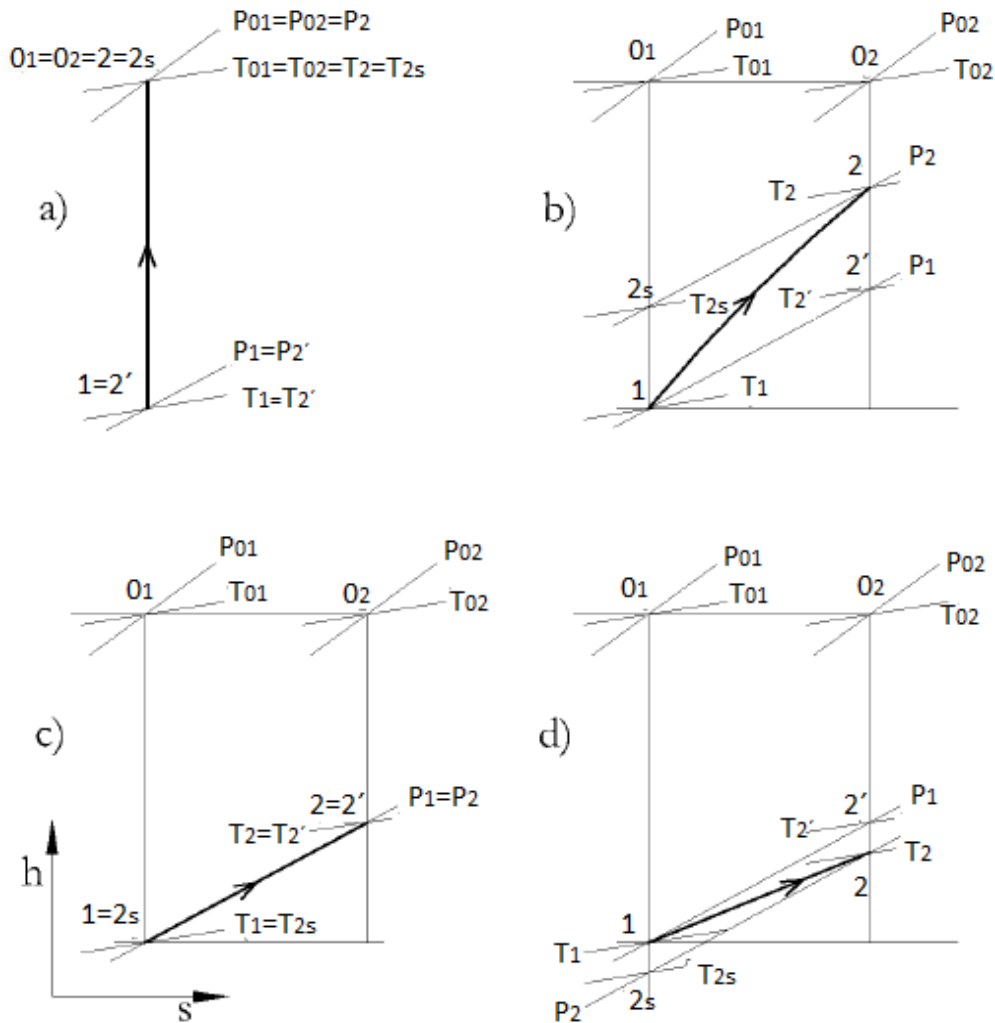
Pokud je kinetická energie vstupujícího proudu částečně využita k zvětšení tlaku, nastává stav (viz obr. 3-4 b)), kdy:

- $p_{01} > p_2 > p_1 \rightarrow 0 < \zeta_c < 1$ .

Snahou při návrhu difuzoru je docílit stavu, aby  $\zeta_c \rightarrow 0$ .

Poslední možnost, která může nastat (viz obr. 3-4 d)), je charakterizována tím, že ztráty v difuzoru způsobují další pokles tlaku. Tento stav je naprosto nežádoucí. Pro tento typ proudění platí:

- $p_{01} > p_2 < p_1 \rightarrow \zeta_c > 1$ .



Obr. 3-4: Možnosti termodynamických dějů [5]

### 3.2.1 Vliv tvaru geometrie difuzoru na ztráty

Největší vliv na ztráty v difuzoru z hlediska geometrie má úhel rozevření difuzoru  $\alpha$  a bezrozměrné rozšíření difuzoru  $n$ , viz kap. 2.3.1. Zvětšující se úhel rozevření ovlivňuje odtržení proudu od stěny difuzoru. Čím větší je úhel rozevření, tím větší jsou vzniklé ztráty. Tyto ztráty je možné snížit, při shodném stupni rozšíření, prodloužením difuzoru (tedy zmenšením úhlu rozevření). V tomto případě ale naopak dojde k nárůstu ztrát třením o stěny. Je zapotřebí stanovit optimální úhel rozevření  $\alpha_{opt}$ . Existují různé empirické vztahy. Pro difuzory s kruhovým průřezem a s malými rychlostmi proudu je možné vycházet ze vztahu, který stanovil I. E. Idělčík:

$$\alpha_{opt} = 0,43 \cdot \left( \frac{\xi}{\varphi_H} \cdot \frac{n+1}{n-1} \right)^{0,445}, \quad (26)$$

kde:

- $\xi$  - součinitel odporu závislý na Reynoldsově čísle,
- $\varphi_H$  - součinitel stanovený experimentálně,
- $n$  - stupeň rozšíření difuzoru.

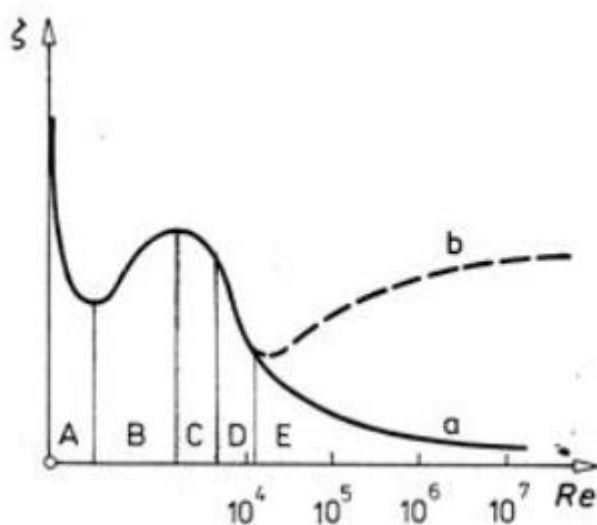
K největšímu stlačení dochází za nejužším místem difuzoru. Experimenty bylo zjištěno, že pro stupeň rozšíření  $n = 2,5 \div 3,5$  a pro úhel  $\alpha = 8 \div 15^\circ$  je možné v tomto průřezu dosáhnout až 90 % stlačení z celkové komprese v difuzoru [5].

### 3.2.2 Vliv Reynoldsova čísla na ztráty v difuzoru

Energetické ztráty v difuzoru závisí na velikosti Reynoldsova čísla ( $Re$ ). Reynoldsovo číslo je blíže charakterizováno, viz kap. 3.3.3. Teoretickými výpočty a experimenty bylo zjištěno, že při zvyšování Reynoldsova čísla dochází ke snižování ztrát v difuzoru. Vliv Reynoldsova čísla je možné pozorovat na diagramu:  $\zeta = f(Re)$ , viz obr. 3-5. Tento diagram je výsledkem mnoha autorů. V rozsahu malých hodnot Reynoldsova čísla je znatelná značná proměnnost ztrátového součinitele. Se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem dochází k postupnému přechodu do oblasti, ve které je jeho vliv téměř zanedbatelný, respektive do oblasti, ve které již Reynoldsovo číslo žádným způsobem neovlivňuje ztrátový součinitel. Tato oblast se nazývá automodelní.

Na obr. 3-5 jsou znázorněny jednotlivé oblasti [9]:

- A. - oblast, která je charakterizována velmi nízkými hodnotami  $Re$ ;
- B. - oblast, ve které se odtrhává laminární mezní vrstva a ztrátový součinitel začíná nabývat vyšší hodnoty;
- C. - oblast, ve které se nachází stabilnější mezní vrstva a ztrátový součinitel začíná klesat;
- D. - oblast s turbulentní mezní vrstvou, ztrátový součinitel nadále klesá;
- E. - oblast, ve které se turbulentní vrstva buď udrží v přilehlém stavu (možnost *a* - dochází k dalšímu poklesu ztrátového součinitele), nebo se neudrží v přilehlém stavu (možnost *b* - dochází k nárůstu ztrátového součinitele).



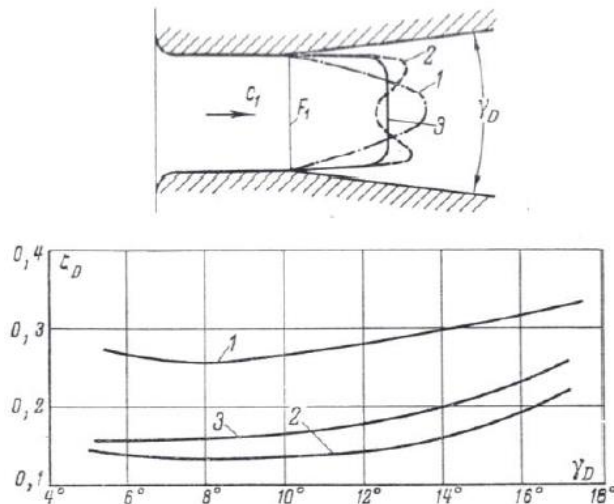
Obr. 3-5: Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově čísle vstupního proudu [3]

### 3.2.3 Rychlostní pole na vstupu do difuzoru

Tvar rychlostního pole má také vliv na ztráty v difuzoru. Na obr. 3-6 je možné pozorovat tři typy rychlostních profilů a jejich vliv na ztrátový součinitel v závislosti na úhlu rozevření difuzoru:

- profil 1 představuje laminární rychlostní profil s minimální rychlostí u stěny (k odtržení dochází ihned za počátkem difuzoru),

- profil 2 představuje proudění s vyšší rychlostí u stěny, než v jeho středu (optimální rychlostní profil),
- profil 3 představuje profil, kde rychlost proudění u stěny se téměř shoduje s rychlostí v jeho středu.



Obr. 3-6: Vliv rychlostního pole na ztráty v difuzoru [1]

### 3.2.4 Možnosti snížení ztrát

Výše byly popsány jednotlivé ztráty, které se vyskytují v difuzorech. Při snižování energetických ztrát dochází vždy k zmenšování jedné nebo několika těchto dílčích ztrát. Ztrátová energie je vždy určena pomocí součinitele  $\zeta_c$ . V praxi se využívají různé způsoby, pomocí kterých je možné snižovat vzniklé ztráty při proudění s odtržením proudu. Jejich hlavním úkolem je posunout či odstranit místo odtržení proudu z prostoru difuzoru.

Mezi metody patří:

- odsávání mezní vrstvy,
- tangenciální vefukování do mezní vrstvy,
- příčné vefukování do mezní vrstvy,
- zavedení syntetizovaného paprsku.

Další možností je použití difuzorů, které mají:

- příčně drážkované či stupňované stěny,
- podélně drážkované stěny.

## 3.3 Mezní vrstva

### 3.3.1 Charakteristika mezní vrstvy

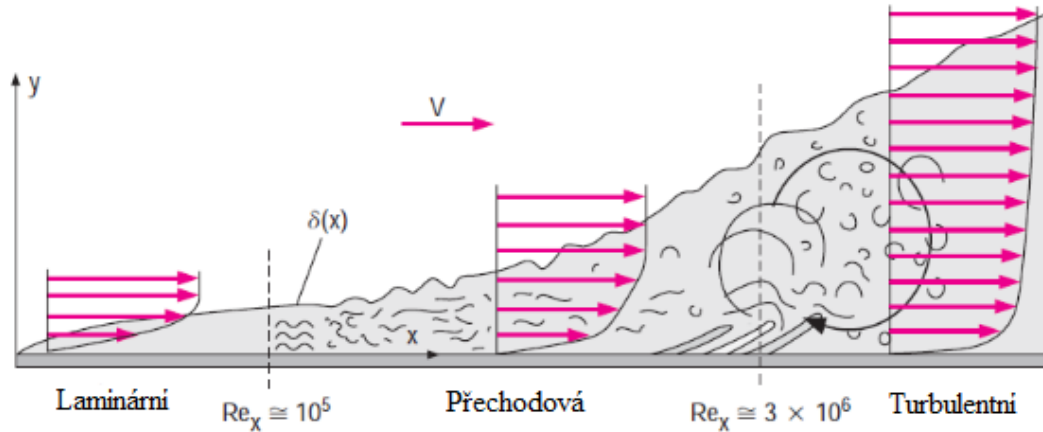
Mezní vrstva je tenká vrstva tekutiny, která se nachází v blízkosti obtékaných stěn. Důvodem vzniku mezní vrstvy je zákon ulpívání na stěně (projevuje se vazkost tekutiny). Vně mezní vrstvy je víření téměř zanedbatelné, tudíž proudění je možné považovat za potenciální. Na povrchu obtékaného tělesa je rychlost proudění nulová. Směrem k vnější hranici dochází k nárůstu rychlosti až na hodnotu, která odpovídá rychlosti potenciálního proudu. Malá tloušťka vrstvy způsobí, že gradient rychlosti v této oblasti nabývá velkých hodnot, a proud je zde tudíž značně vířivý.



### 3.3.2 Proudění v mezní vrstvě

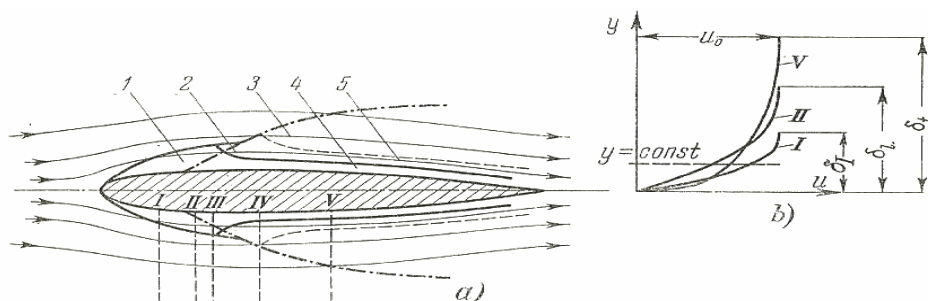
V mezní vrstvě jsou definovány tři oblasti proudění, viz obr. 3-7:

- 1) laminární,
- 2) přechodové,
- 3) turbulentní.



Obr. 3-7: Laminární, přechodová a turbulentní mezní vrstva [32]

V těsné blízkosti náběžné hrany profilu, viz obr. 3-8, je laminární rychlostní profil (pouze v případě, že proud má nízkou intenzitu turbulence). V určitém místě dojde k přechodu laminárního pohybu do pohybu turbulentního. Této oblasti se říká přechodová oblast a proudění je zde smíšené. Za touto oblastí se již rozprostírá stabilní turbulentní vrstva. Po vzniku turbulentní vrstvy se i nadále v těsné blízkosti stěny udržuje laminární proudění tzv. vazká podvrstva.



Obr. 3-8: Schéma mezní vrstvy na povrchu profilu křídla: a – změna tloušťky a struktury mezní vrstvy podél povrchu profilu: 1 – laminární část vrstvy; 2 – přechodová oblast; 3 – turbulentní část vrstvy; 4 – laminární podvrstva; b – rychlostní profily v různých průřezech vrstvy [1]

Poprvé mezní vrstvu matematicky popsal německý inženýr Ludwig Prandtl. Diferenciální rovnice laminární mezní vrstvy v Prandtlově tvaru je [1]:

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$
(27)

Soustava rovnic (27) musí být řešena za následujících okrajových podmínek:

$$y = 0; \quad u = 0; \quad v = 0,$$
$$y \rightarrow \infty; \quad u \rightarrow u(x).$$

Odvozená podmínka  $\partial p / \partial y = 0$  udává, že rozložení tlaku je na vnější hranici mezní vrstvy a na povrchu obtékaného tělesa stejné.

### 3.3.3 Reynoldsovo číslo

Jedná se o nejnámější pravděpodobnostní číslo. Reynoldsovo číslo  $Re$  udává poměr setrvačné síly a viskozity (odpor prostředí v důsledku vnitřního tření). Pomocí  $Re$  čísla se určuje, zda proudění tekutiny je laminární, přechodové či turbulentní. Čím nižší je vliv třecích sil částic tekutiny na celkový odpor, tím vyšší hodnoty nabývá  $Re$  číslo. Reynoldsovo číslo je dáno následujícím vztahem:

$$Re = \frac{w \cdot x}{\vartheta} = \frac{w \cdot x \cdot \rho}{\eta}. \quad (28)$$

Hodnota pohybující se kolem  $Re_{kr} = 2300$  je označována jako tzv. kritická hodnota Reynoldsova čísla. Typy proudění jsou definovány následovně:

- $Re < 2\,300$  → proudění laminární,
- $Re \in \langle 2\,300; 10^5 \rangle$  → proudění přechodové (smíšené),
- $Re > 10^5$  → proudění turbulentní.

### 3.3.4 Charakteristické tloušťky mezní vrstvy

Tloušťka mezní vrstvy  $\delta$  není přesně definována. Tloušťka mezní vrstvy  $\delta$  závisí na zvoleném bodu, který podle dohody určuje hranici mezní vrstvy. Pro výpočty mezní vrstvy se využívají tzv. integrální tloušťky. Tyto tloušťky závisí na  $\delta$ .

Mezi integrální tloušťky patří:

- pošinovací tloušťka  $\delta^*$ ,
- impulsová tloušťka  $\delta^{**}$ ,
- energetická tloušťka  $\delta^{***}$ .

Odvození integrálních tlouštěk je podrobněji popsáno v literatuře, viz například [11].

### 3.3.5 Odtržení mezní vrstvy

Existují dvě podmínky, které musí být splněny, aby došlo k odtržení mezní vrstvy:

- kladný tlakový gradient v místě odtržení (pouze v difuzorní oblasti),
- nulová hodnota smykového napětí  $\tau_w$  na stěně (zaniknutí všech třecích sil).

Kladný gradient tlaku způsobí ve směru proudění nárůst tloušťky mezní vrstvy. V případě rychlého nárůstu mezní vrstvy může dojít k jejímu odtržení od stěny difuzoru. Odtržení mezní vrstvy je nežádoucí jev, který má za následek zvýšení tlakových ztrát. Vlivem těchto ztrát není možné dosáhnout požadovaného výstupního tlaku. Na základě znalosti rovnic (27) lze jednoduše dokázat, že poloha bodu odtržení u laminární mezní vrstvy není závislá na  $Re$  čísle.

K experimentálnímu určení místa se nejčastěji využívají následující hypotézy:

- nulová rychlost částic u stěny,
- FFF koeficient.

Teoreticky je možné místo odtržení stanovit následujícím způsobem.

Okrajové podmínky v místě odtržení jsou:

$$y = 0; \quad u = 0; \quad v = 0. \quad (29)$$

Po dosazení podmínek (29) do rovnice (27) platí:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = v \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)_{y=0}. \quad (30)$$

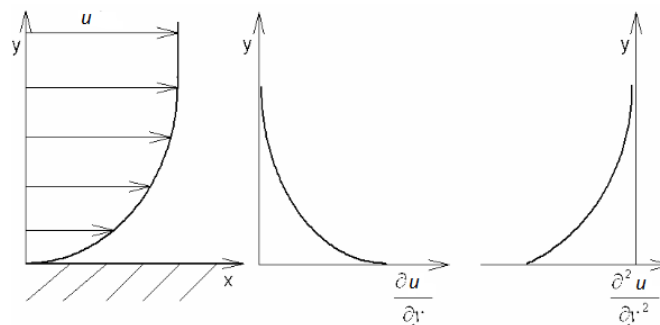
Pokud platí, že tlakový gradient v mezní vrstvě je:

$$\frac{dp}{dx} < 0, \quad (31)$$

tak musí platit, že člen na pravé straně rovnice:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) < 0. \quad (32)$$

Nerovnost rychlosti a její derivace při záporném tlakovém gradientu je znázorněna na obr. 3-9.



Obr. 3-9: Rychlost a její derivace při záporném tlakovém gradientu [5]

Ze znalosti podmínek pro odtržení mezní vrstvy od stěny je možné stanovit tlakový gradient při odtržení jako:

$$\frac{dp}{dx} > 0, \quad (33)$$

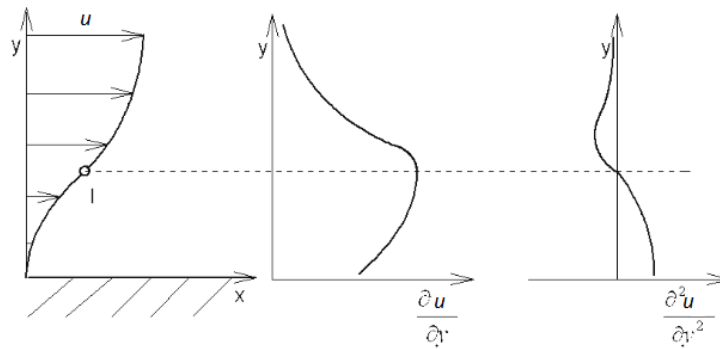
aby byla dodržena platnost Prandtlovy rovnice, musí platit:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) > 0. \quad (34)$$

V určité vzdálenosti od stěny však bude platit vztah (32), což znamená, že v určité vzdálenosti od stěny se bude nacházet bod, ve kterém bude splněna následující rovnost:

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0. \quad (35)$$

Tento bod odpovídá místu, ve kterém nastává odtržení proudu, viz obr. 3-10.



Obr. 3-10: Rychlost a její derivace při kladném tlakovém gradientu [5]

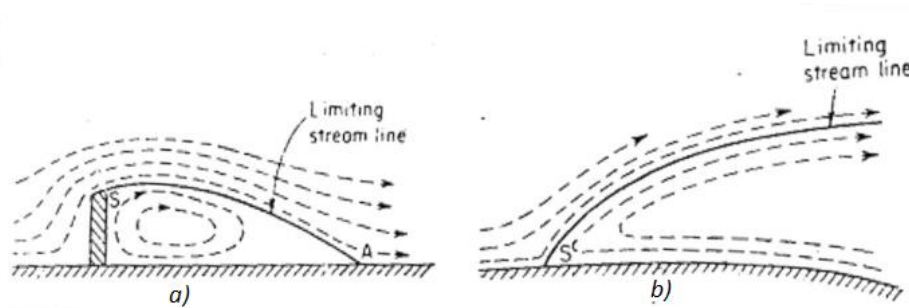
### 3.3.6 Separační bublina

Separační bublina je jev vznikající u stěny v případě odtržení proudu, který je charakterizován stálými víry. Tyto víry jsou od hlavního proudu odděleny hraniční plochou („limiting stream line“). Separační bublina se utváří pouze při nízkých  $Re$  číslech. Separační bubliny se dělí na dva typy:

- otevřená separační bublina,
- uzavřená separační bublina.

V případě, kdy dojde k odtržení proudu vlivem vložené překážky, se jedná o uzavřenou separační bublinu (obr. 3-11). Překážka způsobí, že proud se na vystouplé hraně odtrhne a poté opět přilne k obtékanému povrchu.

V druhém případě proud již nepřilne zpět k povrchu. Vymezený prostor se proto nazývá otevřená separační bublina, viz obr. 3-11.



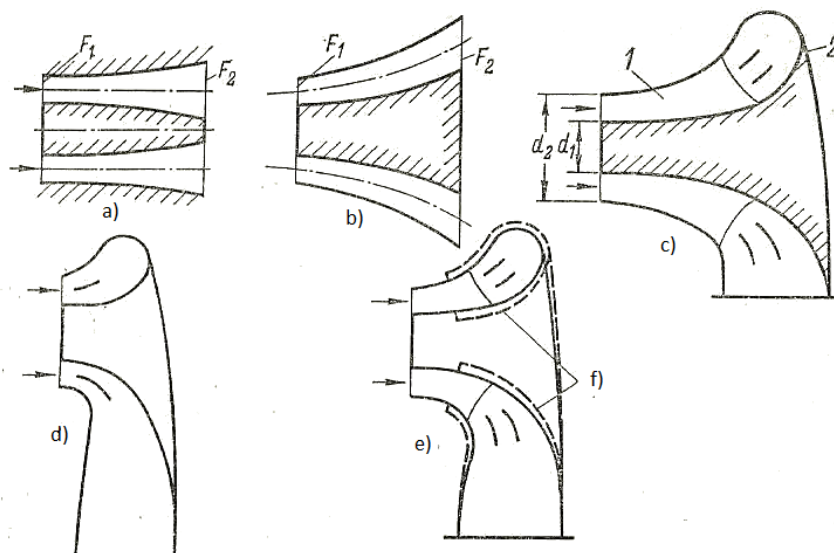
Obr. 3-11: Separační bublina: a – uzavřená, b – otevřená [20]

## 4 Výstupní hrdla

Difuzorová výstupní hrdla jsou důležitou součástí turbostrojů. V praxi se nejčastěji používají k propojení posledního stupně parní turbíny s kondenzátorem. Hlavním úkolem difuzorového výstupního hrdla je zvýšení účinnosti turbostroje a odvod páry do kondenzátoru. Princip hrdla je obdobou výše zmíněného podzvukového difuzoru, viz kap. 3. V hrdle dochází k přeměně kinetické energie výstupního média v energii potenciální. Vhodnou geometrií hrdla je možné dosáhnout co nejnižších energetických ztrát, viz kap. 3.2. Minimální energetické ztráty mají podstatný vliv na požadované zvýšení účinnosti turbostroje. Podle směru, ve kterém je médium odváděno z turbostroje, je možné výstupní hrdla rozdělit na:

- axiální výstupní hrdlo,
- radiální výstupní hrdlo,
- diagonální výstupní hrdlo,
- axiálně-radiální výstupní hrdlo.

Jednotlivé typy jsou na obr. 4-1.

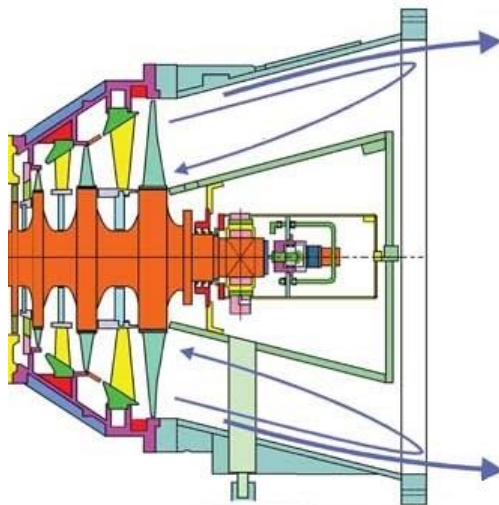


Obr. 4-1: Typy výstupních hrdel [3]

První dva typy *a, b* představují nejjednodušší zakřivené prstencové difuzory. Průtok média u těchto výstupních hrdel je buď osový, nebo diagonální. Další tři provedení mají za úkol pootočit médium o  $90^\circ$  od osy točivých částí. Typ *c* je tvořen prstencovým difuzorem 1 a krátkým radiálním difuzorem 2. Podstatná přeměna kinetické energie na potenciální se uskutečňuje již v prstencovém difuzoru. V radiálním difuzoru dochází k pootočení média od osy při relativně nízkých rychlostech. U provedení *d* dochází nejprve k pootočení média o  $90^\circ$  a až poté v radiálním difuzoru k přeměně kinetické energie na potenciální. Provedení *e* je kombinované. Přeměna kinetické energie na potenciální se uskutečňuje před pootočením, ale i po něm. Diagonální stupňovitý difuzor je označen písmenem *f*. Provedení výstupního hrdla se volí podle konstrukčního uspořádání celého systému [3].

Tato práce se věnuje axiálním výstupním tělesům. Další text se zabývá právě tímto konkrétním typem. Axiální výstupní tělesa se používají u malých turbostrojů do výkonu zhruba 180 MW,

kde je možné prodloužit ložiskovou vzdálenost bez negativního vlivu na průhyb hřídele a kritické otáčky. Příklad axiálního výstupního tělesa je schematicky znázorněn na obr. 4-2.

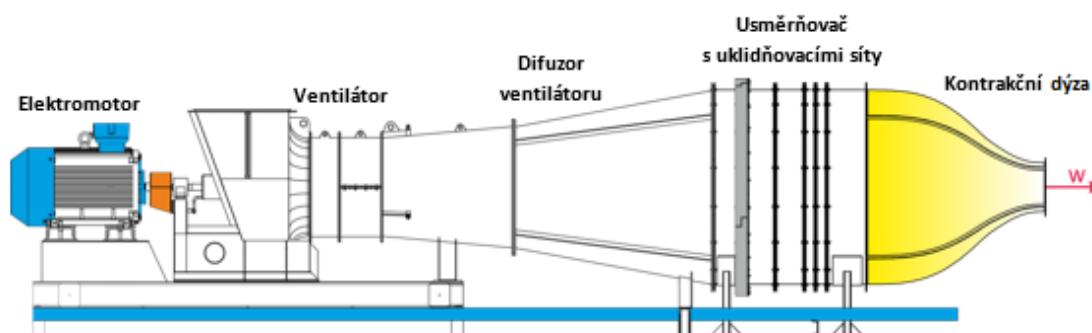


Obr. 4-2: Axiální výstupní těleso [29]

## 5 Zkušební zařízení

Zkušební zařízení je umístěno ve společnosti Doosan Škoda Power s. r. o. (dále DŠPW), přesněji v laboratoři experimentálního výzkumu proudění. Zařízení je tvořeno aerodynamickým tunelem, na jehož výstupu je připevněn model výstupního tělesa.

Schéma aerodynamického tunelu s otevřeným cyklem je znázorněno, viz obr. 5-1. Vzduch z okolního prostředí je nasáván ventilátorem ARK 800 od firmy ZVVZ Machinery a. s., který je poháněn elektromotorem o výkonu 160 kW. Ovládání elektromotoru je zajištěno pomocí frekvenčního měniče od firmy ABB, což umožňuje plynulou regulaci otáček ventilátoru. Výstupní rychlost ze vzduchového tunelu se pohybuje v rozmezí od 10 do 80 m/s. Připevněním modelu výstupního tělesa na výstupu z kontrakční dýzy dojde k dodatečnému zmenšení výstupního průřezu, respektive průřezu na vstupu do modelu. Z tohoto důvodu, společně s vlivem difuzorového efektu, jsou dosahované rychlosti na vstupu do modelu vyšší než původně deklarovaných 80 m/s. V rámci této práce je měření prováděno pro rychlosti dosahujících max. 100 m/s.



Obr. 5-1: Schéma aerodynamického tunelu [6]

Nasátý vzduch z okolního prostředí proudí přes difuzor ventilátoru a usměrňovač s uklidňovacími sítmi do kontrakční dýzy. Ke kontrakční dýze je připevněn model axiálního výstupního tělesa, viz obr. 5-2, kterým vzduch proudí dále a na jehož konci vychází zpět do atmosféry.

Model představuje zmenšené axiální výstupní těleso vycházející ze skutečné koncepce, která byla navržena pro turbínu do Velké Británie o výkonu 38 MW. Jednotlivé komponenty, které tvoří axiální těleso, jsou patrné na fotografii, viz obr. 5-3. Pro účely této práce bude měření prováděno pouze na referenční variantě prázdného výstupního tělesa. To znamená, že výstupní těleso je bez veškerých podpěr a výztuh či jiných provozních komponent a teoreticky by tak mělo mít minimální aerodynamický odpor. Z provozního a pevnostního hlediska je tato varianta samozřejmě nemožná a reálný výstupní trakt bude vždy obsahovat různé výztuhy, podpěry (především ve spodní rovině pod ložiskovým stojanem) nebo například olejové potrubí. Navazující výzkum (již mimo rozsah této práce) se bude zabývat hledáním optimální konfigurace výstupního traktu tak, aby výsledný součinitel zvýšení tlaku  $c_p$  dosahoval co nejvyšších hodnot. V ideálním případě může při vhodně zvolené konfiguraci výstupního traktu dosahovat i hodnoty vyšší než u referenčního prázdného tělesa. V konkrétních číslech lze mluvit o předpokládaném zlepšení součinitele  $c_p$  z nyní uvažované hodnoty 0 až na hodnotu 0,4. V přepočtu na jednotku výkonu 100 MW se jedná o zvýšení výkonu v řádu  $150 \div 400$  kW v závislosti na úrovni vakua kondenzátoru a dalších parametrech. Uvažováno je i s využitím přidavného vefukování do mezní vrstvy vnější stěny difuzoru (aktivní řízení mezní



vrstvy). V současnosti ovšem probíhá úprava rozvodu tlakového vzduchu a přidavné vefukování tak nebude v rámci této práce využito.

Na vstupu do difuzoru výstupního tělesa je umístěna stacionární lopatková mříž. Profil lopatek umožňuje do proudu vzduchu přidat obvodový úhel rychlosti rozložený po výšce lopatky, jako tomu je u skutečného turbostroje. Jistým limitem experimentu je, že ve vstupním proudu není obsažena radiální složka rychlosti, která má společně s axiální složkou rychlosti nejvýznamnější zastoupení. Je to dáno tím, že simulace radiální složky v laboratorních podmínkách je velmi problematická a její vliv tak bude sledován především numerickými výpočty.



Obr. 5-2: Aerodynamický tunel s modelem výstupního tělesa [6]



Obr. 5-3: Komponenty axiálního tělesa [6]



## 6 Nejistoty měření

Měření je jedním ze základních způsobů získávání kvantitativních informací o stavu dané veličiny. Zkoumá geometrické, fyzikální a další vlastnosti předmětů. V praxi není žádné měření, žádný přístroj ani žádná použitá měřicí metoda absolutně přesná. Existuje velké množství faktorů, které negativně ovlivňují měřicí proces, což se projeví odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Je tedy možné říci, že výsledek měření se vždy nachází v určitém intervalu (tolerančním poli) kolem skutečné hodnoty. Chyby, které jsou vnášeny do měření, je možné rozdělit na:

- systematické,
- náhodné,
- hrubé.

Dále je možné chyby dělit podle svého zdroje na chyby:

- přístroje,
- měřicí metody,
- pozorování,
- vyhodnocení.

V současné době je pojem „chyby měření“ vytlačován novou ideologií, která je označována termínem „nejistoty měření.“

Pojem nejistota měření je označením pro parametr, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření. Nejistota měření vymezuje interval. V tomto intervalu se s určitou pravděpodobností nachází skutečná hodnota měřené veličiny. Celková nejistota měření se skládá z dílčích nejistot (složek) [14].

### 6.1 Zdroje nejistot

Jevy ovlivňující neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření se označují jako zdroje nejistoty měření. Existuje nepřeberné množství zdrojů nejistot, které se méně či více podílejí na odchylce od skutečné hodnoty, proto zde budou pro příklad uvedeny jen ty nejzásadnější:

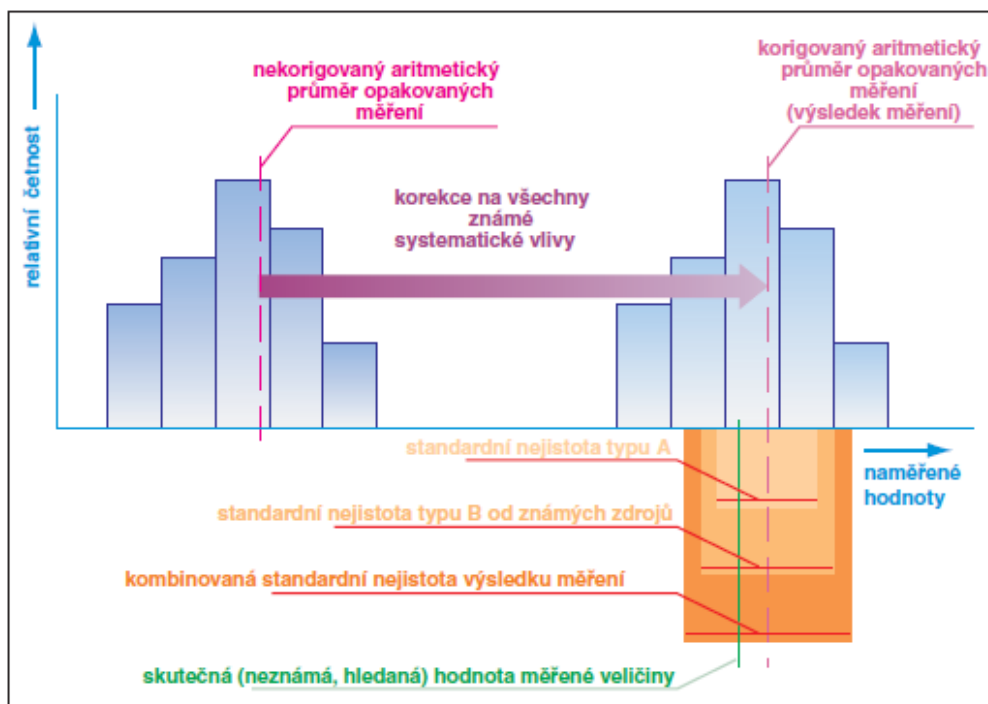
- nevhodný výběr přístroje,
- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny,
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních,
- nevhodný výběr vzorků,
- nevhodný postup při měření,
- nepřesnost etalonů,
- neznámé nebo nekompensované vlivy prostředí,
- linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení,
- subjektivní vlivy obsluhy.

### 6.2 Typy nejistot

Existují dva typy nejistot:

1. nejistota typu A – statistické zpracování naměřených údajů,
2. nejistota typu B – jiné než statistické zpracování naměřených údajů.

Výsledná nejistota je označována jako nejistota kombinovaná. Na obr. 6-1 je znázorněno typické rozložení naměřených hodnot měřené veličiny.



Obr. 6-1: Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření [14]

### 6.3 Nejistota typu A

Nejistota typu A vychází z opakované série měření. Předpokladem je, že jednotlivá měření jsou vzájemně nezávislá a provedena za shodných podmínek. Získaná data jsou následně zpracována pomocí statistické analýzy. Prvním krokem je stanovení odhadu střední hodnoty  $\bar{y}$  pomocí aritmetického průměru vytvořeného z jednotlivých naměřených hodnot  $y_1, y_2, \dots, y_N$ :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i. \quad (36)$$

Nejistota příslušná tomuto odhadu se vypočte jako výběrová směrodatná odchylka této výsledné hodnoty:

$$u_{Ay} = s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (37)$$

Tento vztah se uplatňuje pouze v případě, že počet měření  $n \geq 10$ . Pokud tato podmínka není splněna, nelze výslednou hodnotu považovat za spolehlivou a je zapotřebí zvolit jiný postup. Jednou z možností je výpočet korigované nejistoty  $U_{Ak} = k \cdot s$ , kde  $k$  je příslušný korekční koeficient. V úvahu lze vzít i možnost zanedbání nebo odhadnutí této nejistoty a přistoupit k výpočtu nejistoty typu B. Zvolený postup závisí z velké části na zkušenosti a kvalifikovaném odhadu [15].

## 6.4 Nejistota typu B

Nejistoty typu B vychází z jiných než statistických přístupů. Jsou dány již známými, identifikovatelnými a kvantifikovatelnými zdroji. Výsledná nejistota se odhaduje na základě všech dostupných informací o měřené veličině  $X$  a jejich možných změnách. Například se používají:

- údaje výrobce měřicí techniky,
- zkušenosti z předchozích sérií měření,
- poznatky o chování materiálu,
- údaje získané při kalibraci,
- nejistoty referenčních údajů v příručkách, specifikacích nebo kalibračních listech.

Nejistota typu B zahrnuje dílčí nejistoty jednotlivých zdrojů  $u_{Bzj}$ . V případě, že je známa maximální odchylka  $j$ -tého zdroje nejistoty  $z_{jmax}$ , určí se nejistota  $u_{Bzj}$  pomocí následujícího vztahu:

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k}. \quad (38)$$

Součinitel  $k$  vychází ze znalosti rozdělení hustoty pravděpodobnosti odchylek daného zdroje nejistoty. Součinitel  $k$  nabývá např. pro normální rozdělení hodnoty 2 a pro rovnoměrné rozdělení hodnoty  $\sqrt{3}$ . Hodnota standardní nejistoty  $u_{Bzj}$  bývá často rovnou uvedena, např. v kalibračním certifikátu přístroje. S touto hodnotou by však měla být zpravidla uvedena i hodnota použitého součinitele  $k$ .

Aby mohla být stanovena výsledná nejistota, je zapotřebí definovat tzv. koeficient citlivosti  $A_j$  příslušného zdroje nejistoty. Tento koeficient je v případě nepřímého měření dán následujícím vztahem:

$$A_j = \frac{\partial y}{\partial x_j} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_j)}{\partial x_j}, \quad (39)$$

kde:

- $y$  - odhad výstupní veličiny,
- $x_j$  - odhady vstupních veličin,
- $f$  - známý funkční vztah.

Výsledná nejistota typu B se pro  $p$  zdrojů  $z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_p$  vypočte podle následujícího vztahu:

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 u_{Bzj}^2}, \quad (40)$$

## 6.5 Standardní kombinovaná nejistota

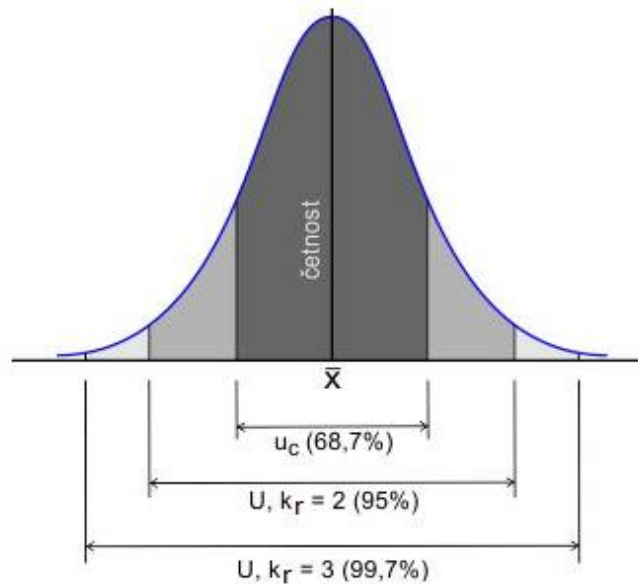
V praxi obvykle není možné zanedbat jeden nebo druhý typ nejistoty. Je vždy nutné vyjádřit výsledný efekt nejistoty typu A i B. Výsledná nejistota se označuje jako nejistota kombinovaná  $u_c$  a je dána vztahem:

$$u_c = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2} \quad (41)$$

## 6.6 Rozšířená nejistota

Nejistota měření je vždy interpretována s určitou pravděpodobností. Pro stanovení požadovaného intervalu spolehlivosti se využívá koeficientu rozšíření  $k_r$ . Pro nejběžnější používané normální rozdělení nabývá hodnot 1, 2 a 3. Hodnotě koeficientu  $k_r$  odpovídá interval spolehlivosti dle obr. 6-2. Rozšířená nejistota  $U$  je tak určena vztahem:

$$U = k_r \cdot u_c \quad (42)$$



Obr. 6-2: Gaussovo rozdělení [31]

Pokud se v odhadu nejistoty vyskytují dvě významné složky, výsledné rozdělení pravděpodobnosti bude lichoběžníkové a koeficient rozšíření je nutné určit prostřednictvím následujících vztahů:

$$\beta = \frac{|\delta_K - \delta_S|}{\delta_K + \delta_S} \quad (43)$$

$$k_r = \frac{1 - \sqrt{(1-p) \cdot (1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \quad (44)$$

kde:

$\delta_K, \delta_S$  - převládající složky nejistot,

$p$  - hodnota pravděpodobnosti.

Pro tzv. pravděpodobnou chybu nabývá hodnota pravděpodobnosti  $p = 0,95$ , což je v souladu s normálním rozdělením pravděpodobnosti.

## 7 Kalibrace

Velmi důležitý úkon metrologie, který předchází samotnému měření, je vlastní kalibrace měřidel. Kalibrace je činnost, jejíž hlavním úkolem je za specifikovaných podmínek odvodit vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření. Tyto informace se následně použijí k určení vztahu pro získání výsledku měření z indikace [23]. Kalibrace stanovuje metrologické charakteristiky přístroje, referenčního materiálu atp. V praxi se nejčastěji kalibruje metodou přímého porovnávání. Každé kalibrované měřidlo je opatřeno kalibračním listem a štítkem. Při kalibraci se lze setkat s těmito typy úloh:

- kalibrace měřidla s jednou nominální hodnotou,
- kalibrace několika měřidel se stejnou nominální hodnotou,
- kalibrace měřidla se spojitou stupnicí.

### 7.1 Kalibrace měřicího zařízení

Před samotným měřením dat bylo zapotřebí provést kalibraci měřicích zařízení. V rámci této práce byl zkalibrován celý měřicí řetězec s odporovým teploměrem Pt100, pomocí kterého se měřila teplota vstupujícího média. Sondy použité pro odběry tlaků a jim odpovídající měřicí řetězce byly zkalibrovány dříve společností DŠPW a opatřeny příslušnými kalibračními štítky.

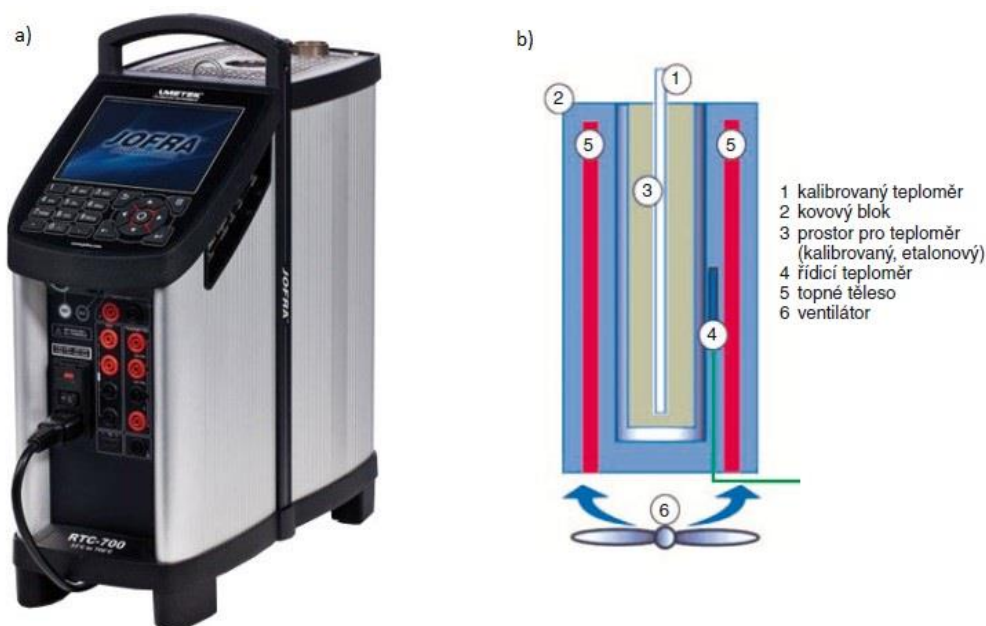
### 7.2 Kalibrace Pt100

Zkalibrován byl celý měřicí řetězec skládající se z odporového čidla Pt100 a A/D převodníku NI 9217. Předmětem popisované teplotní kalibrace bylo získání odezvy zmiňovaného měřicího řetězce na známou referenční teplotu. K tomuto účelu byla využita kalibrační pec Ametek Jofra RTC 700-B, viz obr. 7-1 (a), s přesností nastavené teploty do 0,11 °C. Hlavní částí pece je suchý kovový blok. Teplota uvnitř kalibrační pece je řízena pomocí topných těles a příslušného referenčního teploměru. Schéma pece je znázorněno na obr. 7-1 (b). Mezi základní charakteristiky kalibrační pece patří:

- značný teplotní rozsah,
- teplotní stabilita,
- homogenita teplotního pole,
- přesnost,
- rychlost dosažení požadované teploty.

Kalibrace probíhala ve čtyřech referenčních bodech v rozmezí teplot 33 ÷ 48 °C. Vyšší teploty nejsou během experimentu očekávány. Kalibrační pec Ametek má měřicí rozsah 33 až 700 °C a ve společnosti DŠPW je určena především pro kalibraci teplotních čidel pracujících za vyšších teplot. Teplota vzduchu během experimentu popisovaného v této práci zpravidla dosahuje max. hodnoty cca 30 °C v závislosti na měřeném režimu a době provozu. Z tohoto důvodu byla zvolena kalibrace způsobem prokázání shody se specifikací, a to v uvedeném rozsahu 33 ÷ 48 °C. Předpokladem je, že pokud kalibrované teplotní čidlo měří v uvedeném rozsahu teplot v souladu se specifikací, bude tomu tak pravděpodobně i pro teploty, které jsou testovanému rozsahu blízké. Nejistota měření s takto ověřeným teplotním čidlem bude odpovídat standardním výpočtům dle GUM.

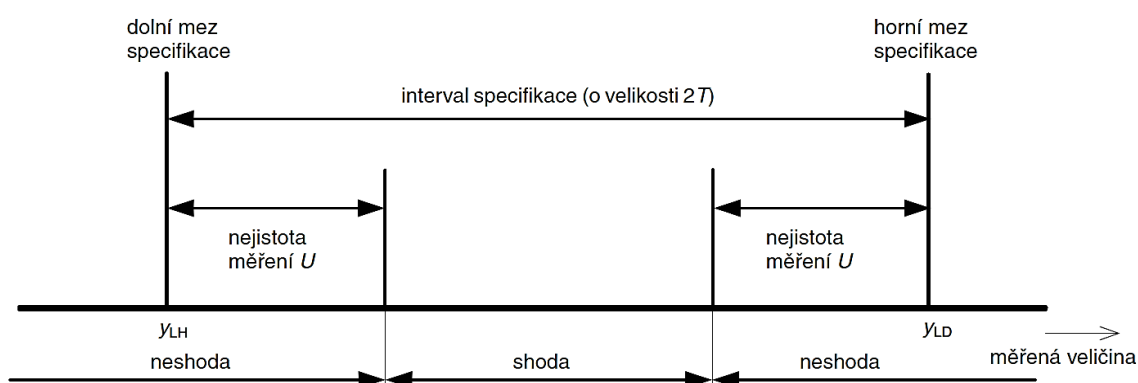
Hodnocením shody se specifikovanými požadavky (specifikací) se zabývá například norma ČSN ISO 10576. V tomto textu bude odkazováno především na článek z odborného časopisu AUTOMA [4].



Obr. 7-1: a) Kalibrační pec Ametek RTC 700-B [22], b) schéma kalibrační pece [13]

### 7.3 Teorie vyjádření shody se specifikací

Zjednodušeně lze říci, že pokud výsledek měření leží uvnitř mezi specifikace, je specifikace splněna. V opačném případě, leží-li výsledek měření mimo specifikované rozmezí, požadavkům specifikace není vyhověno [4]. Důležitou roli zde hraje poměr nejistoty, s níž jsou známy vlastnosti etalonu a nejistoty kalibrovaného přístroje. Způsob určení shody se specifikací je nejlépe patrný z obr. 7-2. Shoda se specifikací platí pro všechny naměřené hodnoty ležící v rozmezí  $(y_{LD} - U)$  až  $(y_{LH} + U)$ . Vzhledem k tomu, že rozšířená nejistota  $U$  je obecně určena s pravděpodobností zhruba 95 %, je obecně uznanou praxí, že stanovisko ohledně shody je na stejné úrovni pravděpodobnosti [4].



Obr. 7-2: Shoda se specifikací [4]

### 7.4 Nejistota měření etalonu a kalibrovaného přístroje

Odhad nejistoty měření kalibrovaného přístroje, respektive celého měřicího řetězce, je uveden v kap. 8.1.1 a odpovídá údajům ve specifikaci. Nejistota měření etalonu odpovídá údajům ze specifikace kalibrační pece a její odhad je uveden níže.

Nejistota kalibrace se skládá především ze standardní nejistoty referenčního teploměru, která je za předpokladu rovnoměrného rozložení rovna:

$$u_{REF} = \frac{\delta_{REF}}{k} = \frac{0,11}{\sqrt{3}} = \pm 0,06 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (45)$$

Dalším vlivem vstupující do celkové nejistoty kalibrace je stabilita nastavení požadované teploty, viz tabulka 7-1 převzatá ze specifikace. Standardní nejistota je určena vztahem:

$$u_{STAB} = \frac{\delta_{STAB}}{k} = \frac{\delta_{STAB}}{\sqrt{3}}. \quad (46)$$

Tabulka 7-1: Chyba stability nastavené teploty [22]

Teplotní rozsah [°C]	33 ÷ 125	125 ÷ 425	425 ÷ 700
$\delta_{STAB}$ [°C]	$\pm 0,008$	$\pm 0,015$	$\pm 0,02$

Nejistota zanesená vlivem axiální homogenity teplotního pole v měřicí jínce byla eliminována pomocí referenčního DLC sensoru. DLC sensor měří rozdíl teplot mezi spodní (tzv. hlavní zónou) a horní zónou měřicí jímy a pomocí zpětné vazby je plynule měněn příkon topných spirál kalibrační pece. Topné spirály jsou dvě, každá pro danou zónu. Teplota je ustálena v momentě nastavení nulové teplotní difference mezi oběma zónami. Chyba DLC sensoru je určena specifikací, viz následující tabulka 7-2 a vztah (47).

Tabulka 7-2: Chyba vlivem axiální homogenity [22]

Teplotní rozsah [°C]	33 ÷ 100	100 ÷ 420	420 ÷ 700
$\delta_{hom}$ [°C]	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$	$\pm 0,40$

$$u_{hom} = \frac{\delta_{hom}}{k} = \frac{\delta_{hom}}{\sqrt{3}} \quad (47)$$

Nejistota vlivem přestupu tepla do okolí není uvažována. Pro kalibraci byla použita přesně vrtaná jíma s minimální vzduchovou mezerou kolem kalibrovaného snímače. Ponoření teplotního snímače je 210 mm.

Výsledná standardní nejistota kalibrace je dána vztahem (48) a rozšířená nejistota vztahem (49).

$$u_{kal} = \sqrt{u_{REF}^2 + u_{STAB}^2 + u_{hom}^2} \quad (48)$$

$$U_{kal} = k \cdot u_{kal} \quad (49)$$

## 8 Měření teplot

V této práci byl k měření teploty použit odporový platinový teploměr Pt100 s A/D převodníkem od firmy National Instruments. Před samotným experimentálním měřením byl zkalibrován celý tento měřicí řetězec. V praxi se také velmi často využívá pro měření teploty termočlánek.

V následujících kapitolách jsou popsány obě možnosti měření teplot a jsou uvedeny také postupy pro výpočet nejistot měření. Právě výsledná nejistota byla rozhodující z hlediska výběru, viz kap. 13.3.1.

### 8.1 Plášťový odporový teploměr – Pt100

Pt100 je označení pro odporový plášťový teploměr, který je charakterizován odporem 100 Ω při teplotě 0 °C. Teploměr Pt100 se používá pro přesné měření velkého rozsahu teplot: -200 ÷ +850 °C. Jedná se o platinový odpor navinutý na vhodný substrát. Odporové teploměry pracují na principu změny elektrického odporu kovů v závislosti na teplotě. S rostoucí teplotou se úměrně zvyšuje velikost elektrického odporu. Funkce, které popisují závislost odporu na teplotě, je nutné rozdělit do dvou intervalů:

- -200 ÷ 0 °C ⇒ kubická závislost

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100^\circ\text{C}) \cdot t^3), \quad (50)$$

- 0 ÷ 850 °C ⇒ kvadratická závislost

$$R_t = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \quad (51)$$

kde:

$R_t$  -elektrický odpor,

$R_0$  - základní odpor při teplotě 0°C,

$t$  - teplota,

A, B, C - teplotní koeficienty.

Pro energetická zařízení se spíše uplatní teplotní interval 0 ÷ +850 °C, a tudíž závislost kvadratická. Odporové teploměry je možné rozdělit do čtyř tolerančních tříd. Jednotlivé třídy přesnosti se liší teplotním rozsahem teploměru a velikostí tolerančního pásma, viz norma ČSN EN 60751 a tabulka 8-1.

Tabulka 8-1: Toleranční třídy přesnosti dle ČSN EN 60 751

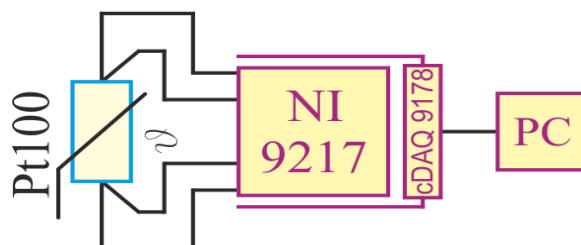
Třída přesnosti	Rozsah teplot [°C]	Odhad nejistoty měření [°C]
AA	-50 ÷ +250	$\pm(0,1 + 0,0017 \cdot  t )$
A	-100 ÷ +450	$\pm(0,15 + 0,002 \cdot  t )$
B	-196 ÷ +600	$\pm(0,3 + 0,005 \cdot  t )$
C	-196 ÷ +600	$\pm(0,6 + 0,01 \cdot  t )$



S třídou přesnosti souvisí:

- způsob zapojení teploměru,
- velikost napájecího proudu (zpravidla se volí nižší než 1 mA),
- frekvence.

Aby se dosáhlo maximální možné přesnosti měření, využívá se čtyřvodičového zapojení teploměru do měřicího řetězce, viz obr. 8-1.



Obr. 8-1: Příklad zapojení Pt100 do měřicího řetězce [9]

### 8.1.1 Nejistota měření – Pt100

V rámci této práce je uvažována toleranční třída A a nejistota odporového teploměru je určena vztahem:

$$\delta_{Pt100} = \pm(0,15 + 0,002 \cdot |t|). \quad (52)$$

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení je standardní nejistota odporového teploměru dána vztahem:

$$u_{Pt100} = \frac{\delta_{Pt100}}{k} = \frac{\delta_{Pt100}}{\sqrt{3}}. \quad (53)$$

Pro měření odporu je v měřicím řetězci použita karta NI 9217. Tato karta je vložena do šasi cDAQ 9178. Pomocí karty se měří úbytek napětí. V případě čtyřvodičového zapojení s kartou NI 9217 je možné určit vlastní chybu převodníku, viz tabulka 8-2.

Tabulka 8-2: Odhad nejistoty měření karty NI 9217 [27]

rozsah teplot [°C]	teplota okolí	
	typická 25 ± 5 [°C]	maximum -40 ÷ +70 [°C]
	odhad nejistoty měření [°C]	
-200 ÷ +150	±0,15	±0,50
+150 ÷ +850	±0,20	±1,00

Nejistota převodníku je dána vztahem (54), který vychází ze znalosti teploty okolí (25 °C) a rozsahu teploty (-200 ÷ +150 °C). Opět je uvažováno rovnoměrné rozdělení a standardní nejistota je určena vztahem, viz (55).

$$\delta_{NI9217} = \pm 0,15 \text{ °C}. \quad (54)$$

$$u_{NI9217} = \frac{\delta_{NI9217}}{k} = \frac{\delta_{NI9217}}{\sqrt{3}}. \quad (55)$$

Pomocí rovnic (53) a (55) je možné stanovit výslednou nejistotu typu B měřicího řetězce dle vztahu:

$$u_B = \sqrt{u_{Pt100}^2 + u_{NI9217}^2} \quad (56)$$

Standardní kombinovaná nejistota je tvořena dvojicí  $\delta_{Pt100}$  a  $\delta_{NI9217}$ . V obou výše zmíněných případech je uvažováno rovnoměrné rozdělení, a tudíž výsledné rozdělení je lichoběžníkové. Aby mohla být určena výsledná rozšířená nejistota, musí být nejprve stanoven koeficient rozšíření  $k_r$ . Tento koeficient, při uvažování  $p = 0,95$ , je možné získat pomocí následujících vztahů:

$$k_r = \frac{1 - \sqrt{(1-p) \cdot (1-\beta^2)}}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \quad (57)$$

$$\beta = \frac{|\delta_{Pt100} - \delta_{NI9217}|}{\delta_{Pt100} + \delta_{NI9217}} \quad (58)$$

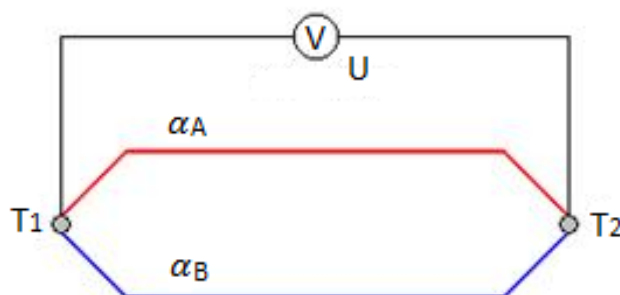
V případě, že je již stanoven koeficient rozšíření, je výsledná rozšířená nejistota dána vztahem:

$$U = k_r \cdot u. \quad (59)$$

## 8.2 Termoelektrické články

Termočlánky patří mezi elektrické teploměry, které pracují na principu termoelektrického jevu a jsou tvořeny ze dvou různých vodičů (polovodičů). Termoelektrický jev se také označuje jako tzv. Seebeckův jev. Seebeckův jev popisuje přímou přeměnu rozdílu teplot na elektrické napětí a naopak. Na obr. 8-2 je znázorněno schéma termočlánku. Pokud  $T_1 \neq T_2$  obvodem prochází elektrický proud a na výstupních svorkách je možné měřit termoelektrické napětí. Čím větší bude rozdíl teplot  $T_1$  a  $T_2$ , tím větší bude měřené napětí.

Velikost vzniklého napětí je ovlivněna velikostí Seebeckova koeficientu  $\alpha$  [ $V \cdot K^{-1}$ ]. Seebeckův koeficient závisí na použitém materiálu vodičů (polovodičů). Hodnota Seebeckova koeficientu pro kovy je řádově  $10^{-6} \div 10^{-5}$  a pro polovodiče  $10^{-5} \div 10^{-3}$ .



Obr. 8-2: Schéma termočlánku [26]

Termočlánky se dělí do pěti skupin podle jejich složení, viz tabulka 8-3. Označují se velkými písmeny.

Tabulka 8-3: Typy termočlánků podle jejich složení

T	$C_u - C_r N_i$	měď-konstantan
E	$N_i C_r - C_u N_i$	chromel-konstantan
J	$F_e - C_u N_i$	železo-konstantan
K	$N_i C_r - N_i A_i$	chromel-alumel
N	$N_i C_r S_i - N_i S_i M_g$	nicrosil-nisil

Princip funkce termočlánků a jednotlivé rovnice pro závislost termoelektrického napětí na teplotě měřicího spoje jsou podrobněji definovány v normách ČSN EN 6058-1, -2 nebo popsány v odborné literatuře, viz [10].

Podobně jako u odporového plášťového snímače je možné stanovit i u termočlánku nejistotu měření. V případě, že termočlánek byl kalibrován, lze určit odhad nejistoty měření z kalibračního listu. Pokud kalibrace nebyla provedena, je nezbytné opět vycházet z tolerančních tříd, viz tabulka 8-4. Toleranční třídy jsou podrobněji definovány, viz norma ČSN IEC 584-2.

Tabulka 8-4: Toleranční třídy pro jednotlivé typy termočlánků, viz ČSN IEC 584-2

Typ termočlánku	Toleranční třída 1	Toleranční třída 2	Toleranční třída 3
T	$-40 \div +125 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-40 \div +133 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-67 \div +40 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$125 \div +350 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,004 \cdot  t $	$133 \div +350 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,0075 \cdot  t $	$-200 \div -67 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,015 \cdot  t $
E	$-40 \div +375 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-40 \div +333 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-167 \div +40 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$375 \div +800 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,004 \cdot  t $	$333 \div +900 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,0075 \cdot  t $	$-200 \div -167 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,015 \cdot  t $
J	$-40 \div +375 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-40 \div +333 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	-
	$375 \div +750 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,004 \cdot  t $	$333 \div +750 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,0075 \cdot  t $	
K, N	$-40 \div +375 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$40 \div +333 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-167 \div +40 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$375 \div +1000 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,004 \cdot  t $	$333 \div +1200 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,0075 \cdot  t $	$-200 \div -167 \text{ } ^\circ\text{C}$ $\pm 0,015 \cdot  t $

Termočlánky lze zapojit do měřicího řetězce společně s některým z typů A/D převodníků (např.: MS SPECTRA, Aligent 34970A, NI 9214). Každý ze zmíněných převodníků má své výhody a nevýhody. Další informace o převodnících je možné získat z příslušné literatury, viz [10], nebo z norem ČSN EN 60584-1, ČSN IEC 584-2 a ČSN EN 60584-3.

### 8.2.1 Nejistota měření – termočlánek typu K

Pro názornost zde bude ukázán výpočet nejistoty měření termočlátku typu K toleranční třídy 1, který je zapojen do měřicího řetězce s převodníkem NI 9214, viz obr. 8-3. Převodník NI 9214 je umístěn v šasi cDAQ 9178. Tento typ převodníku je přímo termočláneková karta, která obsahuje vlastní elektroniku. Výhodou karty je schopnost vypisovat přímo jednotlivá data, resp. teploty.



Obr. 8-3: Schéma měření teploty pomocí termočlátku s převodníkem NI 9214 [9]

Odhad nejistoty termočlátku příslušné toleranční třídy (tabulka 8-4) je dán vztahem:

$$\delta_{TC} = \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (60)$$

Za předpokladu rovnoměrného rozdělení je standardní nejistota určena:

$$u_{TC} = \frac{\delta_{TC}}{k} = \frac{\delta_{TC}}{\sqrt{3}}. \quad (61)$$

Další prvek vnašející do měření nejistotu je převodník NI 9214. Hodnoty nejistot měření tohoto typu převodníku, při teplotě okolí  $23 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$  v závislosti na měřené teplotě, jsou uvedeny, viz tabulka 8-5.

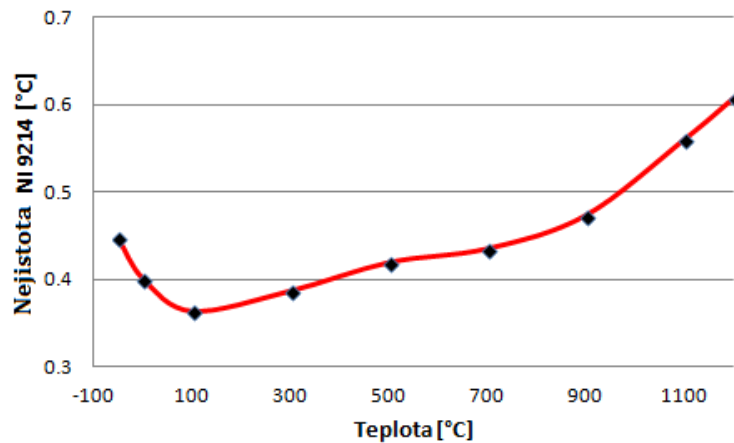
Tabulka 8-5: Odhad nejistoty měření karty NI 9214 [27]

Měřená teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	-100	0	100	300	500	700	900	1 100
Teplota prostředí $23 \pm 5 \text{ } ^\circ\text{C}$	0,53	0,43	0,37	0,39	0,44	0,45	0,55	0,59

Hodnoty z tabulky 8-5 byly proloženy regresní funkcí (polynomem 5. stupně), viz obr. 8-4 nebo rovnice (62). Z regresní funkce lze následně určit nejistotu převodníku  $\delta_{NI9214}$ .

Nejistota převodníku  $\delta_{NI9214}$  vychází z následující rovnice [9]:

$$\delta_{NI9214} = 0,4012 - 0,0007 \cdot t + 4,0083 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 7,9582 \cdot 10^{-9} \cdot t^3 + 6,7994 \cdot 10^{-12} \cdot t^4 - 2,0389 \cdot 10^{-15} \cdot t^5. \quad (62)$$



Obr. 8-4: Závislost nejistoty převodníku NI 9214 na teplotě [9]

V případě rovnoměrného rozdělení platí pro standardní nejistotu převodníku následující vztah:

$$u_{NI9214} = \frac{\delta_{NI9214}}{k} = \frac{\delta_{NI9214}}{\sqrt{3}}. \quad (63)$$

Výsledná nejistota typu B měřicího řetězce je dána vztahem:

$$u_B = \sqrt{u_{TC}^2 + u_{NI9214}^2}. \quad (64)$$

Standardní kombinovaná nejistota je tvořena dvojicí  $\delta_{TC}$  a  $\delta_{NI9214}$ . V obou případech se jedná o rovnoměrné rozdělení, a tudíž výsledné rozdělení je lichoběžníkové. Obdobně jako u odporového snímače musí být určen koeficient rozšíření  $k_r$ , viz kap. 8.1.1. Výsledná rozšířená nejistota měření je poté dána rovnicí:

$$U = k_r \cdot u. \quad (65)$$

## 9 Měření tlaku

Další velmi důležitá stavová veličina je tlak. V této práci byly na měření tlaku použity dva typy tlakových převodníků. Prvním typem je tlakový převodník Rosemount 3051S. Druhým typem je tlakový převodník NetScanner 9116.

### 9.1 Rosemount

Tlakový převodník Rosemount se vyrábí ve dvou provedeních. První provedení slouží k měření relativního tlaku a druhé k měření absolutního tlaku. Pro účely této práce byl využit pouze absolutní tlakový převodník k měření barometrického tlaku, viz obr. 9-1.



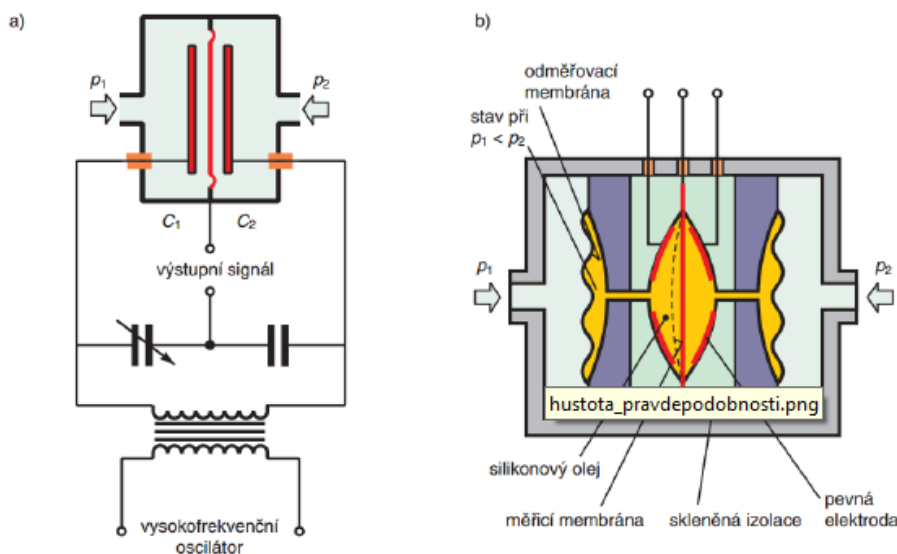
Obr. 9-1: Snímač tlaku Rosemount [25]

Princip měření tlaku závisí na změně kapacity rovinného kondenzátoru. Kondenzátor se skládá ze tří elektrod, viz obr. 9-2. Dvě krajní elektrody jsou pevné a tvoří stěnu komůrky. Mezi těmito elektrodami se nachází třetí elektroda (pohyblivá měřicí membrána). Okolní prostor je vyplněn vhodným médiem, nejčastěji silikonovým olejem. Poloha membrány se mění vlivem tlaku, který na ni působí. U diferenčního čidla je tlak přiváděn z obou stran membrány. U absolutního tlakového čidla je ale jedna z komůrek vakuována, a měřený tlak není tudíž přiváděn z obou stran, ale pouze z jedné. Vychýlení membrány způsobí změnu vzdálenosti mezi elektrodami, což se projeví na změně jeho kapacity. Pro kapacitu jednoduchého deskového kondenzátoru platí následující vztah [18]:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_e \cdot \frac{S}{d}, \quad (66)$$

kde:

- $\varepsilon_0$  - permitivita vakua,
- $\varepsilon_r$  - poměrná permitivita,
- $d$  - vzdálenost elektrod,
- $S$  - plocha elektrod.



Obr. 9-2: Kapacitní čidlo: a) princip, b) schéma [18]

### 9.1.1 Nejistota měření – absolutní tlak

Výsledná nejistota typu B se skládá z několika dílčích nejistot, a to z nejistoty základní, vlivu změny okolní teploty, stability (časové), nejistoty spojené s vibracemi, jimž je převodník vystaven, vlivu napájecího napětí a vlivu montážní polohy. Výpočet nejistoty typu B koresponduje s parametry uvedenými v technické specifikaci pro daný typ převodníku.

Ve všech případech se vychází z rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti. Dílčí nejistoty jsou určeny následujícími rovnicemi [17].

- **Základní nejistota (referenční přesnost)**

$$u_R = \frac{\delta_R}{k} = \frac{\delta_R}{\sqrt{3}}; \delta_R = \pm \frac{x \cdot (URL - LRL)}{100}, \quad (67)$$

kde:

*URL* - horní mez rozpětí snímače (upper range limit),

*LRL* - dolní mez rozpětí snímače (lower range limit).

Veličina *x* udává, kolik procent z rozpětí představuje referenční přesnost. Tato hodnota se liší v závislosti na použitém typu převodníku.

- **Vliv změny okolní teploty**

$$u_T = \frac{\delta_t}{k} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}}; \delta_T = \pm \left( \frac{0,15 \cdot URL}{100} + \frac{0,15 \cdot (URL - LRL)}{100} \right), \quad (68)$$

Tento vztah platí pro rozmezí teploty  $-40 \div +85$  °C.

- **Vliv stability**

$$u_S = \frac{\delta_S}{k} = \frac{\delta_S}{\sqrt{3}}; \delta_S = \pm \frac{y \cdot URL}{100}. \quad (69)$$

Veličina  $y$  udává nejistotu snímače z URL v procentech. Tato veličina opět závisí na použitém typu převodníku a vztahuje se na určité časové období.

- **Nejistota spojená s vibracemi**

Další nejistota, kterou je zapotřebí započítat do výsledného vztahu, je nejistota spojená s vibracemi  $u_v$ . V případě, že je tlakový převodník vystaven vibracím, je nejistota měření upravena o  $\pm 0,1\%$  z URL.

- **Vliv napájecího napětí**

$$u_N = \frac{\delta_N}{k} = \frac{\delta_N}{\sqrt{3}}; \delta_N = \pm 2 \cdot \frac{z \cdot (URL - LRL)}{100}, \quad (70)$$

Chyba zdroje napájecího napětí nabývá hodnoty  $\pm 2$  V a udávaná nejistota je upravena o z procent z rozpětí na jeden volt. Veličina  $z$  opět vychází z technické specifikace.

- **Vliv montážní polohy**

Poloha kalibrovaného tlakového převodníku vnáší do výpočtu další nejistotu a nese označení  $u_p$ .

Výsledná nejistota typu B tlakového převodníku je dána vztahem:

$$u_{ROS} = \sqrt{u_R^2 + u_T^2 + u_S^2 + u_V^2 + u_N^2 + u_P^2}. \quad (71)$$

Převodníky se vyrábějí:

- s unifikovaným proudovým signálem na výstupu,
- s digitálním výstupem.

Pokud má převodník unifikovaný proudový výstup je nutné jej zapojit do měřicího řetězce s A/D převodníkem. Na experimentální základně DŠPW bylo do nedávné doby využíváno A/D převodníku NI 9203, viz schéma měřicího řetězce na obr. 9-3. V současné době je již barometrický tlak měřen Rosemountem typu 3051S, který umožňuje přímou digitální komunikaci. Pro porovnání je uveden rozbor nejistot měření oběma způsoby. Převodník NI 9203 je vybaven osmi analogovými proudovými vstupy s nastavitelným rozsahem. Rozsah závisí na zvoleném typu zapojení:

- bipolární zapojení  $\Rightarrow$  rozsah  $\pm 20$  mA,
- unipolární zapojení  $\Rightarrow$  rozsah  $0 \div +20$  mA.



Obr. 9-3: Schéma měřicího řetězce s A/D převodníkem [9]

Unifikovaný proudový signál vycházející z tlakového převodníku je zapotřebí převést na digitální signál, který je možné zpracovat následujícím členem. K tomu napomáhá již výše zmíněný převodník NI 9203, který umí diskretizovat výstupní signál tlakového převodníku. Diskretizace je uskutečněna s 16 bitovou hloubkou a s maximální vzorkovací frekvencí



200 kS/s. Další informace je možné nalézt, viz [25]. Převodník NI 9203 je dalším zdrojem nejistot, které je zapotřebí uvažovat při výpočtu celkové standardní nejistoty měření celého měřicího řetězce. Jedná se o dva zdroje nejistot označené jako „Gain error“ a „Offset error“ (předpoklad: unipolární zapojení a nekalibrovaný A/D převodník), viz vztahy (72) a (73). Jelikož výstupem z tlakového převodníku je unifikovaný proudový signál, je nezbytné dosazovat horní a dolní mez měřicího rozsahu v jednotkách proudu. Měřicí rozsah je označen indexem ( $i$ ).

$$u_{NI\_G} = \frac{\delta_{NI\_G}}{k} = \frac{\delta_{NI\_G}}{\sqrt{3}}; \delta_{NI\_G} = \pm \frac{0,49 \cdot i}{100}, \quad (72)$$

$$u_{NI\_O} = \frac{\delta_{NI\_O}}{k} = \frac{\delta_{NI\_O}}{\sqrt{3}}; \delta_{NI\_O} = \pm \frac{0,46 \cdot (URL_{(i)} - LRL_{(i)})}{100}. \quad (73)$$

Další nejistota, která vstupuje do výpočtu, je spojena s rozlišovací schopností převodníku. Tato nejistota je obecně určena vztahem:

$$u_B(z_j) = \frac{\delta(z_j)}{2 \cdot k} = \frac{\delta(z_j)}{2 \cdot \sqrt{3}}. \quad (74)$$

Nejistota rozlišovací schopnosti převodníku NI 9203 je stanovena vztahem:

$$u_{ROZ} = \frac{\delta_{ROZ}}{2 \cdot k} = \frac{\delta_{ROZ}}{2 \cdot \sqrt{3}}; \delta_{ROZ} = \frac{20}{2^{16}}. \quad (75)$$

Výsledná nejistota typu B převodníku NI 9203 je dána vztahem:

$$u_{NI\_9203} = \sqrt{u_{NI\_G}^2 + u_{NI\_O}^2 + u_{ROZ}^2}. \quad (76)$$

Pokud jsou již známy všechny druhy nejistot, je možné určit výslednou nejistotu typu B měřicího řetězce podle vztahu:

$$u_B = \sqrt{u_{ROS}^2 + u_{NI\_9203}^2}, \quad (77)$$

$$u_B = \sqrt{u_R^2 + u_T^2 + u_S^2 + u_V^2 + u_N^2 + u_P^2 + u_{NI\_G}^2 + u_{NI\_O}^2 + u_{ROZ}^2}.$$

Všechny veličiny, které jsou obsaženy ve vztahu (77), musí být dosazeny ve stejných jednotkách. Je vhodné pro výpočet použít jednotky proudu. Z tohoto důvodu je nezbytné všechny dílčí nejistoty Rosemountu přepočítat prostřednictvím vztahů (78) a (79). Tyto vztahy vycházejí ze znalosti veličin URL a LRL tlakového převodníku a jim příslušejícího proudového výstupu  $4 \div 20$  mA.

$$i(p) = \frac{20 - 4}{URL - LRL} \cdot p, \quad (78)$$

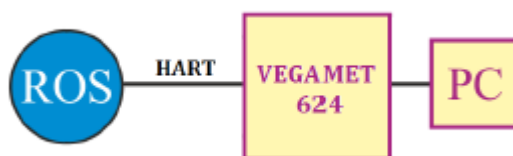
$$p(i) = \frac{URL - LRL}{20 - 4} \cdot i. \quad (79)$$

### 9.1.2 Rosemount 3051S

V této práci byl pro měření barometrického tlaku použit Rosemount 3051S - provedení ultra, který umožňuje přímou digitální komunikaci v tzv. HART protokolu. Pomocí HART protokolu tlakový převodník komunikuje se síťovým zařízením VEGAMET 624. Toto zařízení slouží k zobrazení měřených hodnot a zkonvertování HART signálu na ethernet. Další komunikace tak již probíhá pouze po ethernetové síti. Měřicí rozsah Rosemountu 3051S je  $0 \div 207$  kPa.

#### 9.1.2.1 Nejistota měření – Rosemount 3051S

Jak již bylo zmíněno, výstupem tohoto typu převodníku je digitální signál. Tato vlastnost do značné míry ovlivňuje celkovou nejistotu měření barometrického tlaku. Měřicí řetězec, viz obr. 9-4, obsahuje menší počet prvků. Není zde zapotřebí zařazovat prvky podílející se na převádění unifikovaného proudového signálu na digitální, což má za následek snížení celkové nejistoty měření respektive zvýšení přesnosti měření. Výsledná nejistota typu B tak bude rovna celkové standardní nejistotě. Výpočet nejistoty Rosemountu 3051S koresponduje s parametry uvedenými v technické specifikaci, viz [25], a je dán následujícími vztahy.



Obr. 9-4: Schéma měřicího řetězce – Rosemount 3051S [9]

- **Základní nejistota (referenční přesnost)**

$$u_R = \frac{\delta_R}{k} = \frac{\delta_R}{\sqrt{3}}; \delta_R = \pm \frac{0,025 \cdot (URL - LRL)}{100}, \quad (80)$$

kde referenční přesnost nabývá hodnoty  $\pm 0,025$  % z rozpětí.

- **Vliv změny okolní teploty**

$$u_T = \frac{\delta_t}{k} = \frac{\delta_T}{\sqrt{3}}; \delta_T = \pm \left( \frac{0,0125 \cdot URL}{100} + \frac{0,0625 \cdot (URL - LRL)}{100} \right). \quad (81)$$

Tento vztah platí pro změnu teploty  $\pm 28$  °C.

- **Vliv stability**

$$u_S = \frac{\delta_S}{k} = \frac{\delta_S}{\sqrt{3}}; \delta_S = \pm \frac{0,2 \cdot URL}{100}. \quad (82)$$

Nejistota snímače je  $\pm 2\%$  z URL (po dobu 15 let).

- **Vliv napájecího napětí**

$$u_N = \frac{\delta_N}{k} = \frac{\delta_N}{\sqrt{3}}; \delta_N = \pm 2 \cdot \frac{0,005 \cdot (URL - LRL)}{100}. \quad (83)$$

Chyba zdroje napájecího napětí nabývá hodnoty  $\pm 2$  V a udávaná nejistota je menší než  $\pm 0,005\%$  z rozpětí na jeden volt.

- **Nejistota spojená s vibracemi**

Tlakový snímač je umístěn mimo zdroj vibrací, proto:

$$u_V = 0. \quad (84)$$

- **Vliv montážní polohy**

Vliv rozdílu polohy tlakového snímače při jeho kalibraci a montážní polohy lze zanedbat, proto:

$$u_P = 0. \quad (85)$$

Výsledná nejistota typu B – celková standardní nejistota tlakového převodníku je dána vztahem:

$$u_B = u_{R_{3051S}} = \sqrt{u_R^2 + u_T^2 + u_S^2 + u_V^2 + u_N^2 + u_P^2}. \quad (86)$$

## 9.2 NetScanner 9116

Další tlakový převodník nese označení NetScanner 9116, viz obr. 9-5. Jedná se o inteligentní tlakový převodník s digitálním výstupem, který je vybaven 16 samostatnými piezorezistivními tlakovými snímači. Digitální signál z převodníku je veden do ethernetové sítě. Tento typ převodníku slouží pro měření tlaku v suchých plynech.



Obr. 9-5: NetScanner 9116 [24]

### 9.2.1.1 Nejistota měření – NetScanner 9116

Schéma zapojení NetScanneru, které bylo použito, je znázorněno na obr. 9-6. Výpočet nejistoty NetScanneru 9116 koresponduje s parametry uvedenými v technické specifikaci, viz [24].



Obr. 9-6: Schéma měřicího řetězce – NetScanner 9116

První zdroj nejistoty měření je dán chybou rozlišením. Tato nejistota je ovlivněna měřicím rozsahem (*F. S.* -Full Scale) tlakového převodníku a je dána vztahem:

$$u_R = \frac{\delta_R}{2 \cdot k} = \frac{\delta_R}{2 \cdot \sqrt{3}}; \delta_R = \pm \frac{0.003 \cdot F.S.}{100}. \quad (87)$$

Druhá nejistota vstupující do výpočtu je označována jako nejistota statická (základní). Výpočet této nejistoty je určen rozsahem zvoleného převodníku. V práci byl použit převodník s rozsahem 1 psi (6 895 Pa). Nejistota pro tento převodník je dána vztahem:

$$u_S = \frac{\delta_S}{k} = \frac{\delta_S}{\sqrt{3}}; \delta_S = \pm \frac{0.15 \cdot F.S.}{100}. \quad (88)$$

Nejistota spojená s teplotní závislostí tlakového převodníku a nejistota „line pressure effect“ určující vliv měření tlakové diference na různých tlakových hladinách nejsou v rámci této práce opodstatněné, a tudíž se do výsledné nejistoty nezahrnují.

Výsledná nejistota typu B je určena vztahem:

$$u_B = u_{N_{9116}} = \sqrt{u_R^2 + u_S^2}. \quad (89)$$

## 10 Popis experimentálního měření

V této kapitole je popsáno schéma měření společně s popisem jednotlivých měřicích kanálů. Dále je popsán použitý hardware a způsob jeho zapojení.

### 10.1 Měřicí schéma

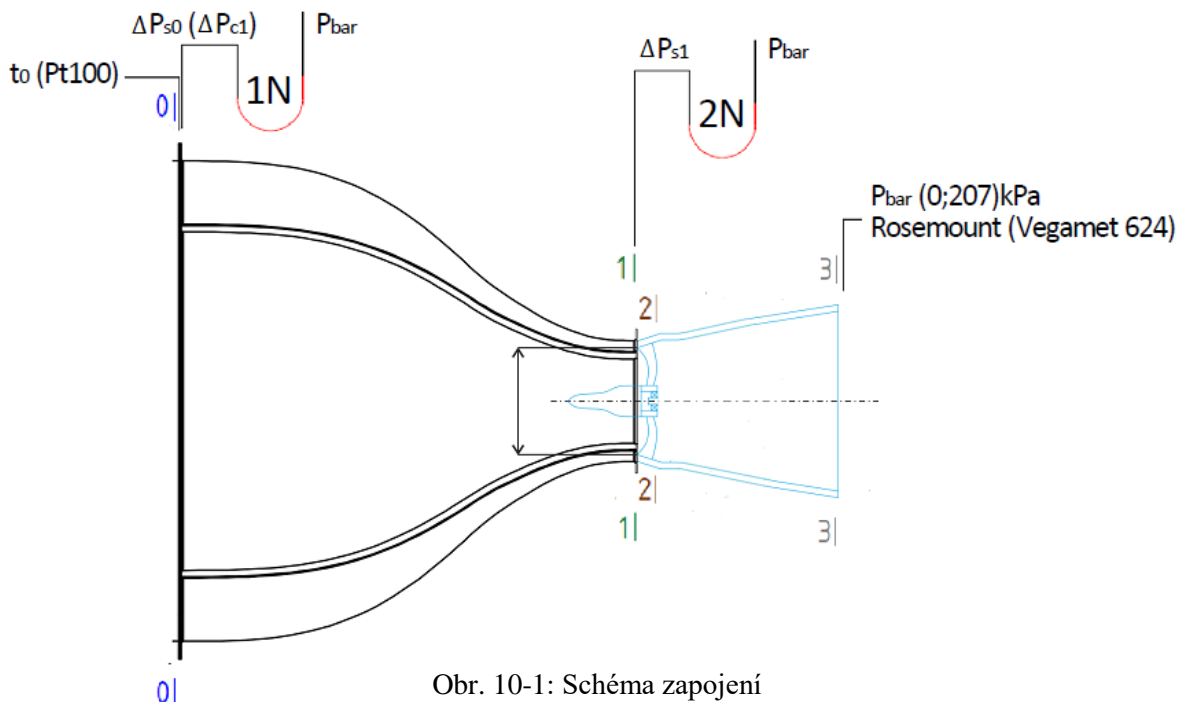
V rámci této práce byly měřeny celkem tři tlaky a jedna teplota vstupujícího média. Tlaky byly stanoveny pomocí absolutního tlakového převodníku Rosemount 3051S a inteligentního tlakového převodníku NetScanner 9116. Teplota proudícího média byla měřena pomocí odporového teploměru Pt100. V tabulce 10-1 jsou uvedeny měřené tlaky a teplota. Označení kanálu písmenem N znamená, že se jedná o tlaky, které byly měřeny pomocí diferenčního tlakového převodníku NetScanner. Tlaky na kanálu 1N a 2N, viz obr. 10-1, jsou určeny jako difference vůči barometrickému tlaku.

Tabulka 10-1: Přehled měřených veličin

Měřená veličina	Popis veličiny	Označení kanálu	Maximální rozsah
$\Delta p_{s0}$	statický tlak v rovině 0	1N	6 895 Pa
$\Delta p_{s1}$	statický tlak v rovině 1	2N	6 895 Pa
$p_{bar}$	barometrický tlak v rovině 3	Rosemount 3051S	207 kPa
$t_0$	teplota vstupujícího média	Pt100	250 °C

Na obr. 10-1 je znázorněn model axiálního výstupního tělesa s vyznačenými měřicími rovinami:

- 0 – rovina procházející kontrakční dýzou aerodynamického tunelu,
- 1 – rovina nacházející se před lopatkovou mříží,
- 2 – rovina nacházející se za lopatkovou mříží,
- 3 – rovina nacházející se na výstupu z axiálního tělesa.

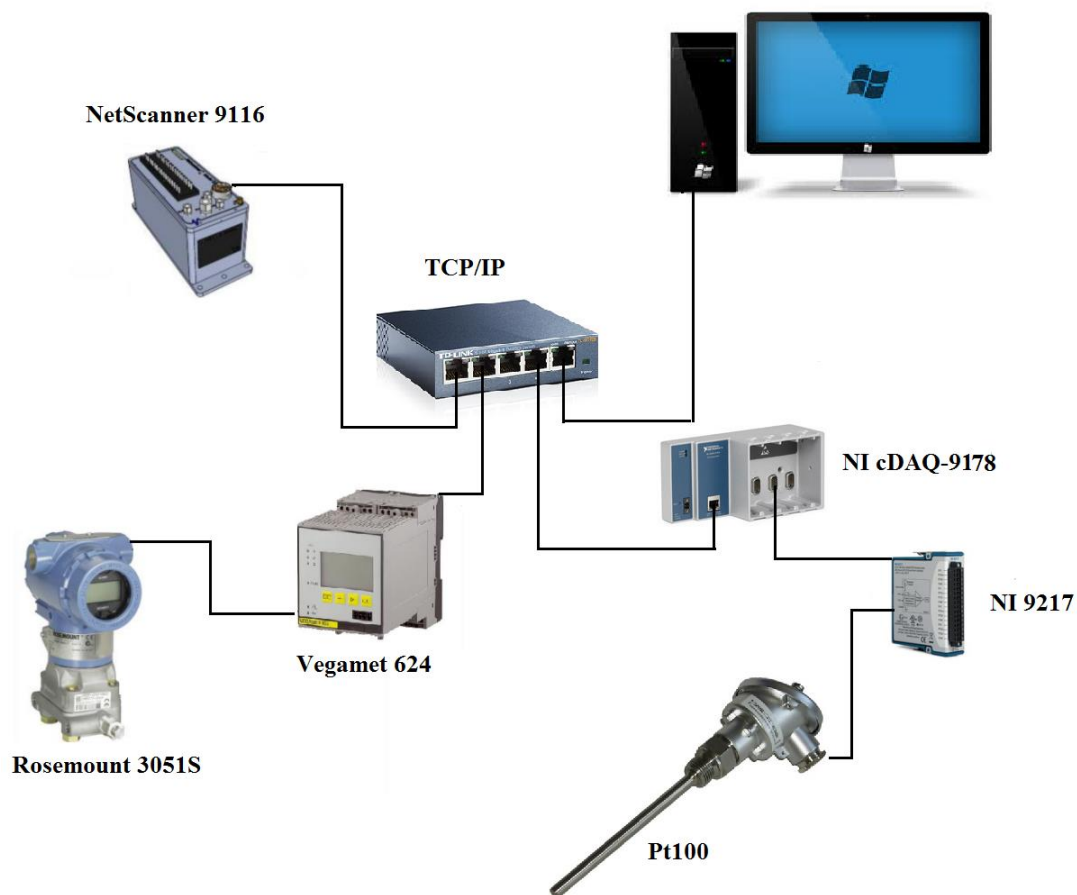


Obr. 10-1: Schéma zapojení

Pomocí tlaků a teplot naměřených v rovinách 0, 1 a 3 je možné stanovit ztrátový součinitel axiálního výstupního tělesa. Použitá aparatura společně s odhadem nejistoty měření je blíže popsána v kap. 8 a kap. 9.

## 10.2 Zapojení měřicích členů

Barometrický tlak je měřen pomocí absolutního tlakového převodníku Rosemount 3051S. Výstupem tohoto typu převodníku je digitální signál. Převodník komunikuje se síťovým zařízením VEGAMET 624 prostřednictvím HART protokolu. Zbylé tlaky jsou měřeny pomocí inteligentního tlakového převodníku NetScanner 9116. Teplota vstupujícího média je měřena pomocí odporového teploměru Pt100, který je připojen k A/D převodníku NI 9217. Tento převodník je umístěn v šasi NI cDAQ-9178. Použitá zařízení komunikují s měřicím počítačem přes ethernetovou síť. Zapojení jednotlivých členů je znázorněno na obr. 10-2.



Obr. 10-2: Schéma zapojení měřicích členů

## 11 Zpracování naměřených dat

Hlavním cílem práce bylo určení ztrátového součinitele axiálního výstupního hrdla v závislosti na rychlosti proudícího média s ohledem na nejistoty měření.

### 11.1 Vyhodnocení naměřených dat v rovině před lopatkovou mříží

V rovině 0 a 1 bylo měřeno  $n$  hodnot tlaků. V každém měřeném časovém okamžiku byla stanovena  $i$ -tá hodnota statického tlaku, brána jako střední hodnota ze 4 odběrů statického tlaku. K výpočtu ztrátového součinitele je ale nezbytné určit také hodnotu celkového tlaku na vstupu do výstupního tělesa. Vzhledem k tomu, že poměr ploch  $S_0/S_1 \cong 21$ , lze rychlost proudění v ukliďňovací komoře považovat za zanedbatelnou vzhledem k rychlosti proudění na vstupu do stacionární lopatkové mříže (při výtokové rychlosti kontrakční dýzy 100 m/s je dle rovnice kontinuity rychlost v ukliďňovací komoře zhruba 4,7 m/s). Obdobně lze zanedbat i samotné tlakové ztráty v kontrakční dýze, což bylo potvrzeno výzkumným měřením provedeným AV ČR [23]. Na základě výše uvedených zjednodušení je možné považovat  $\Delta p_{c1i} = \Delta p_{s0i}$ . Výpočet absolutních tlaků je možné určit pomocí následujících vztahů:

$$\Delta p_{c1i} = p_{c1i} - p_{bar}, \quad (90)$$

$$p_{c1i} = \Delta p_{c1i} + p_{bar}, \quad (91)$$

$$\Delta p_{s1i} = p_{s1i} - p_{bar}, \quad (92)$$

$$p_{s1i} = \Delta p_{s1i} + p_{bar}, \quad (93)$$

$$p_{d1i} = \Delta p_{c1i} - \Delta p_{s1i}. \quad (94)$$

### 11.2 Statistické zpracování naměřených hodnot

Z naměřených hodnot je nezbytné vyfiltrovat odlehlé hodnoty. Jedná se o hodnoty, které by mohly být zatíženy hrubou chybou. Základním předpokladem pro statistické zpracování naměřených hodnot je uvažování normálního rozdělení pravděpodobnosti. Vyloučení odlehlých hodnot je provedeno v několika následujících krocích:

- výpočet střední hodnoty měřených veličin:

$$\Delta \bar{p}_{c1} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_{c1i}}{n}; \quad \Delta \bar{p}_{s1} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta p_{s1i}}{n}; \quad \bar{p}_{bar} = \frac{\sum_{i=1}^n p_{bari}}{n}; \quad \bar{t}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n t_{0i}}{n} \quad (95)$$

(pozn.: další kroky je zapotřebí stanovit pro všechny naměřené veličiny – postup je pro všechny veličiny analogický)

- stanovení výběrové směrodatné odchylky:

$$s_{\Delta \bar{p}_{c1}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_{c1i} - \Delta \bar{p}_{c1})^2}{n - 1}, \quad (96)$$

- vyřazení hodnot celkového tlaku, pro které platí podmínka:

$$|\Delta p_{c1i} - \Delta \bar{p}_{c1}| \geq 2 \cdot s_{\Delta \bar{p}_{c1}}. \quad (97)$$

Po vyřazení hodnot celkového tlaku, které splnily podmínku (97), vznikl 95 % interval těchto hodnot, viz obr. 6-2. Ze zbylých hodnot se opět určí střední hodnota a nová směrodatná odchylka obdobně, viz rovnice (95) a (96).

### 11.3 Výpočet ztrátového součinitele

Z přímo měřených hodnot sledovaných veličin lze vyhodnotit ztrátový součinitel  $\zeta_{1\_3}$ , dle vztahu:

$$\zeta_{1\_3i} = \frac{\Delta p_{c1i}}{p_{d1i}}. \quad (98)$$

Nevýhodou tohoto způsobu je, že do výpočtu je zahrnut vliv samotné stacionární lopatkové mříže. Korektnější by tak bylo měřit sledované veličiny v rovině 2 a vyhodnocovat ztrátový součinitel samotného výstupního tělesa podle vztahu:

$$\zeta_{2\_3i} = \frac{\Delta p_{c2i}}{p_{d2i}}. \quad (99)$$

Vzhledem k tomu, že proudění za lopatkovou mříží je značně neuspořádané a v případě zastaveného výstupního tělesa i rotačně nesymetrické (oproti proudění v rovině před lopatkovou mříží), bylo by nutné získat komplexnější představu o rozložení proudového pole. Měření v jednom referenčním bodě by nebylo možné a traverzovací zařízení nebylo v rámci této práce k dispozici (do budoucna je předpokládáno traverzování v rovině 2). V rámci této práce bylo využito výsledků z numerických simulací provedených ve společnosti DŠPW, ze kterých byly vyhodnoceny základní charakteristiky lopatkové mříže, a sice ztrátový součinitel celkového tlaku  $\zeta_m$  a poměr dynamických tlaků  $p_p$ . Pomocí těchto parametrů lze přepočítat měřené veličiny do roviny 2, viz následující vztah:

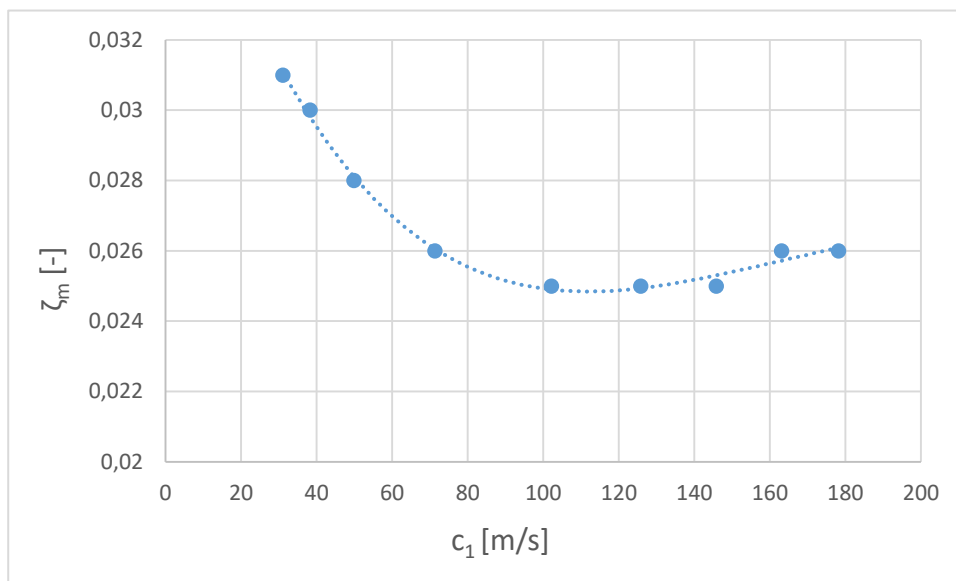
$$\zeta_{2\_3i} = \left( \frac{\Delta p_{c1i}}{p_{d1i}} - \bar{\zeta}_m \right) \cdot \bar{p}_p = \left( \frac{\Delta p_{c1i}}{p_{d1i}} - \frac{(\Delta \bar{p}_{c1} - \Delta \bar{p}_{c2})}{\bar{p}_{d1}} \right) \cdot \frac{\bar{p}_{d1}}{\bar{p}_{d2}}, \quad (100)$$

Numericky byly charakteristiky mříže určeny pro několik rychlostí v rozmezí 30 ÷ 150 m/s. Nezbytné tak bylo vynést získané hodnoty  $\zeta_m$  a  $p_p$  do grafu a proložit je vhodným regresním modelem, viz vztahy (101), (102), obr. 11-1 a obr. 11-2. Po interpolaci byly stanoveny hodnoty  $\zeta_m$  a  $p_p$  pro experimentálně měřené rychlosti. Výpočet v CFD byl proveden pro rychlosti v rozmezí 30 ÷ 150 m/s, proto nemohly být určeny hodnoty  $\zeta_m$  a  $p_p$  pro rychlosti proudění 10 a 20 m/s, jelikož extrapolace mimo interval vypočtených hodnot z CFD by mohla vnést do výpočtu hrubou chybu.

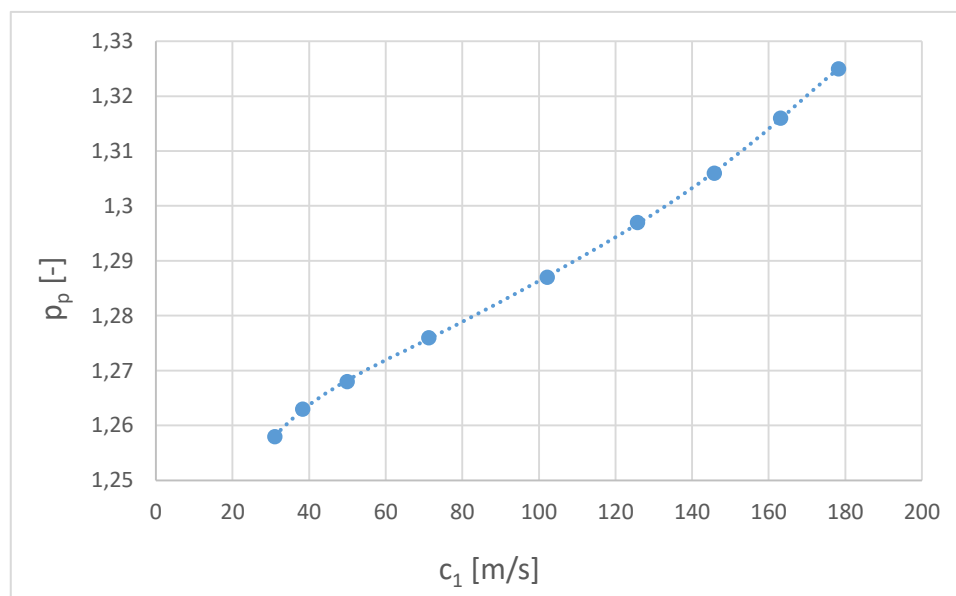
$$y_{\zeta_m} = 8,482 \cdot 10^{-12} \cdot x^4 - 8,258 \cdot 10^{-9} \cdot x^3 + 2,676 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 3,362 \cdot 10^{-4} \cdot x + 3,920 \cdot 10^{-2}, \quad (101)$$

$$y_{p_p} = -4,482 \cdot 10^{-14} \cdot x^6 + 2,962 \cdot 10^{-11} \cdot x^5 - 7,889 \cdot 10^{-9} \cdot x^4 + 1,089 \cdot 10^{-6} \cdot x^3 - 8,188 \cdot 10^{-5} \cdot x^2 + 3,516 \cdot 10^{-3} \cdot x + 1,202. \quad (102)$$





Obr. 11-1: Závislost  $\zeta_m$  na rychlosti  $c_1$



Obr. 11-2: Závislost  $p_p$  na rychlosti  $c_1$

### 11.3.1 Nejistota měření ztrátových součinitelů typu B

Odhad nejistoty měření ztrátového součinitele  $\zeta_{2-3}$  se stanoví pomocí následujícího vztahu [9]:

$$\delta\zeta_{2-3} = \sqrt{A_{\Delta p_{c1}}^2 \cdot \delta\Delta p_{c1}^2 + A_{p_{d1}}^2 \cdot \delta p_{d1}^2 + A_{\zeta_m}^2 \cdot \delta\zeta_m^2 + A_{p_{d2}}^2 \cdot \delta p_{d2}^2}, \quad (103)$$

kde citlivostní koeficienty jsou dány:

$$A_{\Delta p_{c1}} = \frac{\partial\zeta_{2-3}}{\partial\Delta p_{c1}} = \frac{1}{p_{d2}}, \quad (104)$$

$$A_{p_{d1}} = \frac{\partial \zeta_{2,3}}{\partial \Delta p_{d1}} = -\frac{\bar{\zeta}_m}{p_{d2}}, \quad (105)$$

$$A_{\bar{\zeta}_m} = \frac{\partial \zeta_{2,3}}{\partial \bar{\zeta}_m} = -\frac{p_{d1}}{p_{d2}}, \quad (106)$$

$$A_{p_{d2}} = \frac{\partial \zeta_{2,3}}{\partial p_{d2}} = -\left(\frac{\Delta p_{c1}}{p_{d1}} - \bar{\zeta}_m\right) \cdot \frac{p_{d1}}{p_{d2}^2}. \quad (107)$$

Veličiny s označením  $\delta$  představují příslušné kombinované nejistoty měření. Vzhledem k tomu, že není známá nejistota numericky určených charakteristik lopatkové mříže, nebude tato nejistota vyčíslena.

Obdobně lze určit odhad nejistoty měření ztrátového součinitele  $\zeta_{1,3}$ , viz následující rovnice:

$$\delta \zeta_{1,3} = \sqrt{A_{\Delta p_{c1}}^2 \cdot \delta \Delta p_{c1}^2 + A_{p_{d1}}^2 \cdot \delta p_{d1}^2}, \quad (108)$$

$$A_{\Delta p_{c1}} = \frac{\partial \zeta_{1,3}}{\partial \Delta p_{c1}} = \frac{1}{p_{d1}}, \quad (109)$$

$$A_{p_{d1}} = \frac{\partial \zeta_{1,3}}{\partial p_{d1}} = \frac{\partial \zeta_{1,3}}{\partial (\Delta p_{c1} - \Delta p_{s1})} = -\frac{\Delta p_{c1}}{(\Delta p_{c1} - \Delta p_{s1})^2} = -\frac{\Delta p_{c1}}{p_{d1}^2}. \quad (110)$$

## 11.4 Výpočet rychlosti v rovině 1

Rychlost proudícího vzduchu v rovině 1 je možné stanovit pomocí následujícího vztahu:

$$c_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot p_{d1}}{\rho_1}}. \quad (111)$$

Hustota v rovině 1 je určena vztahem:

$$\rho_1 = \rho_0 \cdot \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} = \frac{\Delta p_{s0} + p_{bar}}{r \cdot T_0} \cdot \left(\frac{\Delta p_{s1} + p_{bar}}{\Delta p_{s0} + p_{bar}}\right)^{\frac{1}{\kappa}}, \quad (112)$$

kde

$r$  - univerzální plynová konstanta (pro vzduch  $r = 287,04 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),

$\kappa$  - Poissonova konstanta (pro vzduch  $\kappa = 1,4$ ).

Správnost výpočtu je možné ověřit pomocí Saint Venant-Wantzelovy rovnice pro výpočet výtokové rychlosti v závislosti na měřeném tlakovém spádu:

$$c_{1,p1/p0} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa \cdot r}{\kappa - 1} \cdot T_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}. \quad (113)$$

## 11.5 Výpočet Machova čísla

Machovo číslo v rovině 1 je možné určit pomocí vztahu:

$$M_{a1} = \sqrt{\frac{2}{\kappa - 1} \left[ \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]}. \quad (114)$$

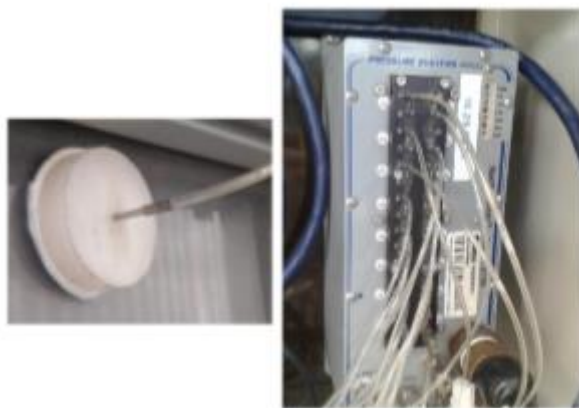
Odvození vztahu je uvedeno v literatuře, viz například [11].

## 12 Postup měření

Tato kapitola je věnována stručnému popisu jednotlivých kroků, které bylo zapotřebí vykonat během celého experimentálního měření, aby došlo k získání požadovaných hodnot.

### 12.1 Odběry tlaků

Velmi důležitým krokem bylo umístění odběrů statického tlaku před lopatkovou mříž výstupního hrdla a na kontrakční dýzu. Postup při přípravě odběrů statických tlaků je proveden v několika krocích. Nejprve musí být vyvrtán otvor ve stěně o průměru 0,5 mm. Na vyvrtaný otvor navazuje ocelová trubička. K ocelové trubičce je připevněna polyuretanová hadička. Ocelová trubička je ustavena k otvoru pomocí plastového kotoučku, který je přilepen ke stěně. Opačné konce polyuretanových hadiček jsou následně zapojeny do příslušných kanálů na tlakovém převodníku NetScanner 9116. Umístění odběrů bylo provedeno pracovníky experimentální laboratoře společnosti DŠPW, viz obr. 12-1.



Obr. 12-1: Odběr statického tlaku [9]

### 12.2 Sběr experimentálních dat

Data byla snímána pomocí odběrů statických tlaků, zároveň byla snímána teplota v uklidňovací komoře pomocí odporového teploměru Pt100. Jednotlivá měření byla provedena za účelem získat data potřebná pro stanovení ztrátových součinitelů v axiálním výstupním tělese v závislosti na rychlosti proudění média. Daná rychlost proudění byla vždy nastavena prostřednictvím příslušných otáček ventilátoru. Samotný odběr dat probíhal již automaticky pomocí měřicí aplikace. Bylo provedeno celkem 10 měření. Při každém měření bylo sbíráno 500 vzorků frekvencí 10 Hz.

## 13 Výsledky experimentálního měření

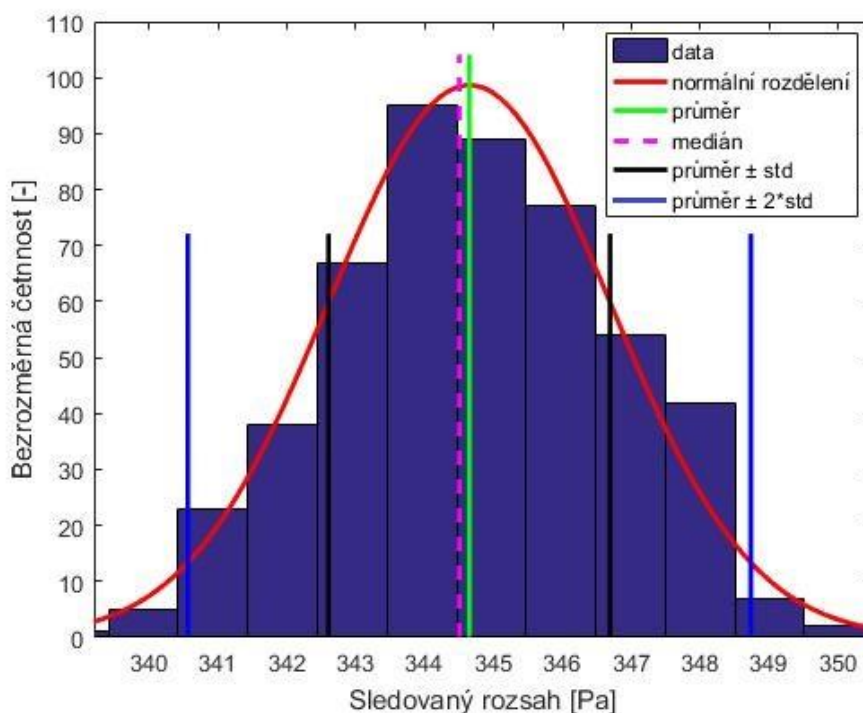
Tato kapitola se zabývá statistickým zpracováním a především vyhodnocením naměřených dat s ohledem na nejistoty měření. Hlavním cílem této práce bylo určit závislost ztrátových součinitelů výstupního tělesa na rychlosti proudícího média.

### 13.1 Statistické zpracování dat – kontrola normality

V rámci této práce bylo uvažováno normální (Gaussovo) rozdělení měřených dat. Důležitým krokem před samotným vyhodnocením měřených dat je proto ověření jejich normality. K posouzení normality se používá nejrůznějších nástrojů statistiky. Grafické metody patří mezi nejrychlejší způsoby, jak lze relativně jednoduše a rychle ověřit normalitu naměřených dat. Pro názornost zde budou uvedeny dva grafické způsoby, které vycházejí z naměřených údajů celkového tlaku  $\Delta p_{c1}$  pro rychlost proudění vzduchu 50 m/s.

#### 13.1.1 Histogram

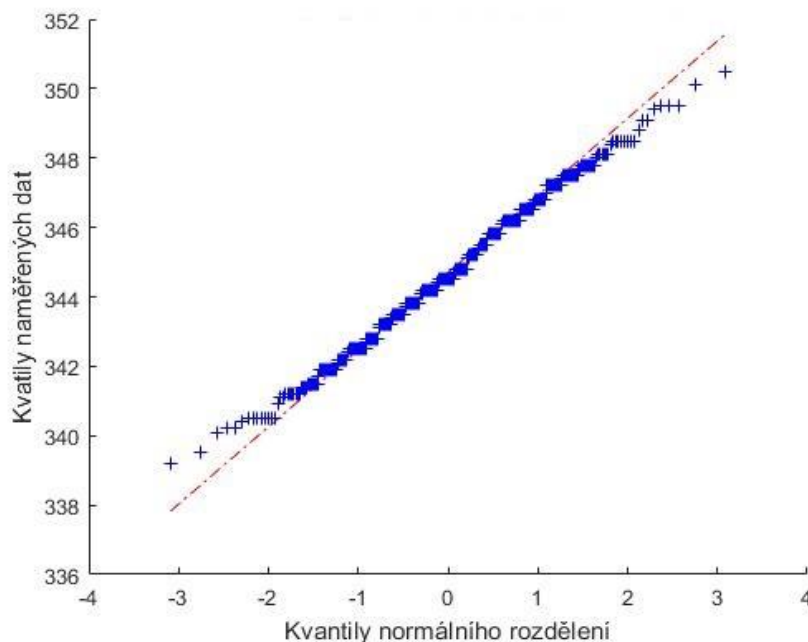
Histogram je sloupcový graf, který přehledně zachycuje rozložení dat. Na vodorovné ose histogramu jsou vyneseny intervaly, do kterých jsou naměřené údaje rozděleny. Svislá osa představuje tzv. bezrozměrnou četnost, tedy počet výskytů sledované veličiny v daném intervalu. Histogram tlaku  $\Delta p_{c1}$  je znázorněn na obr. 13-1. Na obrázku je vyznačen ideální průběh normálního rozdělení, dále aritmetický průměr, medián a meze charakteristických oblastí vycházející ze směrodatné odchylky. Dle uvedeného histogramu lze data považovat za normální.



Obr. 13-1: Histogram celkového tlaku  $\Delta p_{c1}$

### 13.1.2 Quantile – quantile plot (Q-Q plot)

Pomocí Q-Q plotu je opět možné jednoduše ověřit normalitu naměřených dat. Q-Q plot porovnává kvantily naměřených dat s kvantily zvoleného rozdělení. Na obr. 13-2 je možné vidět porovnání kvantilů naměřených dat (celkového tlaku  $\Delta p_{c1}$ ) s kvantily normálního rozdělení. Body normálního rozdělení jsou proloženy přímkou. Pokud se body z naměřených dat jen minimálně odchylují od přímky, je možné považovat rozložení dat za normální. Z obrázku je zřejmé, že většina bodů leží na přímce, proto je možné potvrdit normalitu dat. V případě, že by některé body byly výrazně odchýleny, je nutné posoudit původ tohoto vychýlení a případně tyto body odstranit ze souboru dat.



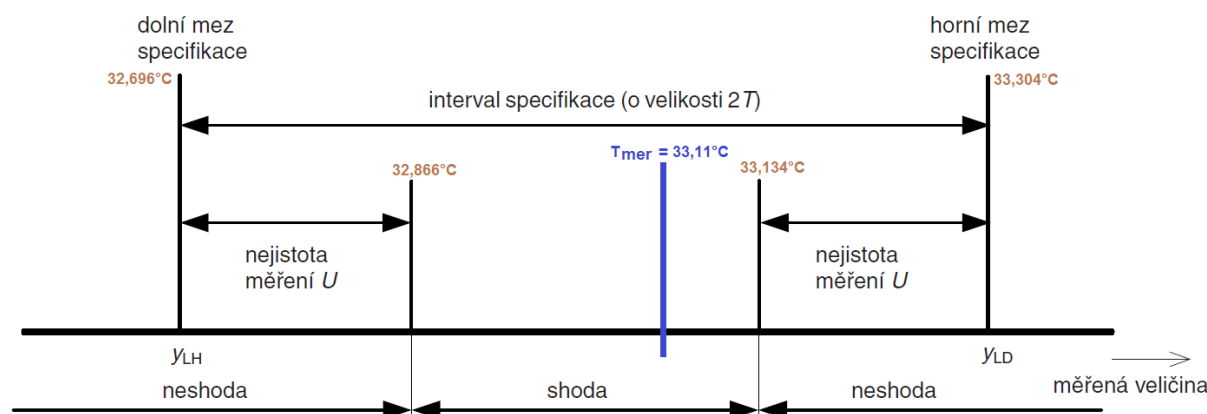
Obr. 13-2: Q-Q plot celkového tlaku  $\Delta p_{c1}$

## 13.2 Výsledky teplotní kalibrace

Kalibrace zahrnovala celý měřicí řetězec, odpor z Pt100 tak byl odečítán přímo z karty NI 9217. Na základě získaných údajů byla sestavena tabulka 13-1. Pro názornost je na příkladu teploty 33 °C uveden obr. 13-3, kde jsou číselně uvedeny dané meze. Z obrázku je patrná shoda se specifikací. Obdobného výsledku bylo dosaženo pro všechny měřicí body. Závěrem lze tak tvrdit, že teplotní čidlo Pt100 je ve shodě s danou specifikací v naměřených bodech pro danou úroveň pravděpodobnosti a ve vztahu k nejistotě měření.

Tabulka 13-1: Ověření shody se specifikací

$T_{etalon}$	$R_{mereny}$	$T_{mereny}$	$\Delta T$	$U_{etalon}$	$T_{specifikace}$	Shoda se specifikací
33	112,8780376	33,112	-0,112	0,17	0,304	Ano
38	114,8057121	38,097	-0,097		0,313	Ano
43	116,6625705	42,906	0,094		0,323	Ano
48	118,5857519	47,894	0,106		0,333	Ano



Obr. 13-3: Potvrzení shody se specifikací

### 13.3 Nejistoty měření

V této podkapitole budou vyhodnoceny odhady nejistot měření teploty a tlaku, které souvisejí s odběrem primárních dat. Při výpočtu těchto nejistot se postupovalo podle vztahů, které byly stanoveny v kap. 8 a 9. Uvedené nejistoty navazují na měření, které bylo provedeno na modelu axiálního výstupního tělesa. Byla zapojena veškerá měřicí aparatura a snímána všechna data potřebná pro výpočet daných nejistot. Dále zde bude vyhodnocen odhad nejistoty měření typu B ztrátového součinitele.

#### 13.3.1 Odhad nejistoty měření teploty

V tabulce 13-2 a tabulce 13-3 jsou uvedeny nejistoty měření odporového platinového teploměru Pt100 a termočlánu typu K zapojených do měřicího řetězce. Výběr teplotního snímače byl ovlivněn výslednou rozšířenou nejistotou měření.

Teplotní snímač Pt100 byl původně připevněn na experimentálním zařízení, a proto bylo pomocí něj sebráno  $n$  hodnot teploty při rychlosti proudění 50 m/s. Odhad střední hodnoty při této rychlosti byl stanoven na teplotu 23,29 °C. Pro porovnání byla spočtena nejistota termočlánu K s touto střední hodnotou a s totožnou nejistotou typu A, což vnáší do výpočtu jistou nepřesnost. Tato nepřesnost ale nemá zásadní vliv na řád rozšířené nejistoty. Z tabulek je zřejmé, že výsledná rozšířená nejistota termočlánu K je řádově větší než nejistota odporového teploměru Pt100. Z tohoto důvodu byl pro měření teploty ponechán na experimentálním zařízení teploměr Pt100, pomocí kterého lze dosáhnout vyšší přesnosti měření.

Tabulka 13-2: Odhad nejistoty měření teploty – Pt100

Měřená veličina X:		teplota $t_1$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		23,29 [°C]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		$\pm 0,003$ [°C]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
Pt100	$u_{Pt100}$	$\pm 0,1135$ [°C]	rovnoměrné
NI 9217	$u_{NI9217}$	$\pm 0,0866$ [°C]	rovnoměrné
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 0,1428$ [°C]	$\pm 0,1428$ [°C]	$\pm 0,2699$ [°C]	
		lichoběžníkové	
Výsledek měření:		$t_{Pt100} = 23,29 \pm 0,27$ [°C]	

Tabulka 13-3: Odhad nejistoty měření – termočlánek K

Měřená veličina X:		teplota $t_1$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		23,29 [°C]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		$\pm 0,003$ [°C]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
TC	$u_{TC}$	$\pm 0,8660$ [°C]	rovnoměrné
NI 9214	$u_{NI9214}$	$\pm 0,2234$ [°C]	rovnoměrné
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 0,8944$ [°C]	$\pm 0,8944$ [°C]	$\pm 1,5463$ [°C]	
		lichoběžníkové	
Výsledek měření:		$t_{TC} = 23,29 \pm 1,55$ [°C]	



### 13.3.2 Odhad nejistoty měření absolutního tlaku

Absolutní tlak na výstupu z tělesa byl měřen pomocí tlakového převodníku Rosemount 3051S s digitálním výstupem a měřicím rozsahem  $0 \div 207$  kPa, viz kap. 9.1.2. Velikost měřených tlaků má vliv na výslednou nejistotu měření, která nabývá značné hodnoty, viz tabulka 13-4. Z tabulky je také patrné, že všechny složky vstupující do výpočtu celkové nejistoty jsou řádově stejně velké, a proto výsledné rozdělení pravděpodobnosti lze považovat za normální.

Tabulka 13-4: Odhad nejistoty měření absolutního tlaku – Rosemount 3051S

Měřená veličina X:		tlak $p_{bar}$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		97351,78 [Pa]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		$\pm 15,76$ [Pa]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
Rosemount 3051S	$u_R$	$\pm 29,8779$ [Pa]	rovnoměrné
	$u_T$	$\pm 89,6336$ [Pa]	
	$u_S$	$\pm 239,0230$ [Pa]	
	$u_N$	$\pm 11,9512$ [Pa]	
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 257,2969$ [Pa]	$\pm 257,7791$ [Pa]	$\pm 515,5583$ [Pa]	
		normální	
Výsledek měření:		$p_{Ros} = 97351,78 \pm 515,56$ [Pa]	

### 13.3.3 Odhad nejistoty měření relativního tlaku

Pro měření relativních tlaků v rovině 0 a 1 byl použit inteligentní tlakový převodník NetScanner 9116. Zásadní vliv na velikost výsledné nejistoty má měřicí rozsah přístroje. Pro měření statického tlaku v rovině 0 byl zvolen měřicí rozsah 6 895 Pa (1 psi). Pro příklad jednoho z měřených tlaků jsou výsledky nejistot uvedeny v tabulce 13-5.

Maximální naměřená hodnota statického tlaku dosahuje hranice cca 1 200 Pa, což má negativní dopad na velikost výsledné nejistoty. Výslednou nejistotu měření by bylo možné snížit zakoupením NetScanneru s menším měřicím rozsahem. Pro měření statického tlaku v rovině 1 byl nejprve použit kanál s měřicím rozsahem 103 421 Pa (15 psi). Naměřené hodnoty dosahovaly velmi nízké hranice, a proto musel být experiment proveden znovu s měřicím rozsahem 6 895 Pa (1 psi). Poté musely být přepočteny i výsledné nejistoty, které se tímto krokem rapidně snížily, viz tabulka 13-6 a tabulka 13-7.

Tabulka 13-5: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 0 – NetScanner 9116

Měřená veličina X:		tlak $p_{s0}$ resp. $p_{c1}$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		344,65 [Pa]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		2,0418 [Pa]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
NetScanner 9116	$u_R$	$\pm 0,0597$ [Pa]	rovnoměrné
	$u_S$	$\pm 5,9712$ [Pa]	
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 5,9715$ [Pa]	$\pm 6,3109$ [Pa]	$\pm 11,1747$ [Pa]	
		lichoběžníkové	
Výsledek měření:		$p_{Net_0} = 344,65 \pm 11,17$ [Pa]	

Tabulka 13-6: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 1 – NetScanner 9116 (rozsah 15 psi)

Měřená veličina X:		tlak $p_{s2}$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		1089,12 [Pa]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		$\pm 10,22$ [Pa]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
NetScanner 9116	$u_R$	$\pm 0,8957$ [Pa]	rovnoměrné
	$u_S$	$\pm 89,5652$ [Pa]	
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 89,5697$ [Pa]	$\pm 90,1509$ [Pa]	$\pm 149,4071$ [Pa]	
		lichoběžníkové	
Výsledek měření:		$p_{Net_1} = 1089,12 \pm 149,41$ [Pa]	

Tabulka 13-7: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 1 – NetScanner 9116 (rozsah 1 psi)

Měřená veličina X:		tlak $p_{s2}$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		1089,12 [Pa]	
Nejistota typu A - $u_A$ :		$\pm 10,22$ [Pa]	
Zdroj přístrojové nejistoty $z_j$		Standardní nejistota dílčího zdroje $u_{Bzj}$	Typ rozdělení
NetScanner 9116	$u_R$	$\pm 0,0597$ [Pa]	rovnoměrné
	$u_S$	$\pm 5,9712$ [Pa]	
Výsledná nejistota $u_B$	Kombinovaná nejistota $u_c$	Rozšířená nejistota U	
		Typ rozdělení	
$\pm 5,9715$ [Pa]	$\pm 11,8367$ [Pa]	$\pm 21,9933$ [Pa]	
		lichoběžníkové	
Výsledek měření:		$p_{Net_1} = 1089,12 \pm 21,99$ [Pa]	

### 13.3.4 Odhad nejistoty měření ztrátového součinitele $\zeta_{1,3}$

Výpočet odhadu nejistoty měření typu B pro ztrátový součinitel  $\zeta_{1,3}$  vychází ze vztahů, které byly uvedeny v kap. 11.3.1. Je patrné, že ztrátový součinitel je určen s nejistotou zhruba 0,5 %, viz tabulka 13-8.

Tabulka 13-8: Odhad nejistoty měření ztrátového součinitele  $\zeta_{1,3}$

Měřená veličina X:		$\zeta_{1,3}$ (při $w = 50$ m/s)	
Odhad střední hodnoty $\bar{x}$ :		0,2404 [-]	
Citlivostní koeficient $A_j$		Kombinovaná nejistota měření	
$A_{\Delta p_{c1}}$	0,0006975 [-]	$\delta \Delta p_{c1}$	6,311 [Pa]
$A_{p_{d1}}$	-0,0001677 [-]	$\delta p_{d1}$	11,911 [Pa]
Výsledek měření:		$\zeta_{1,3} = 0,2404 \pm 0,005$ [-]	

## 13.4 Vyhodnocení měření

V této podkapitole budou shrnuty výsledky získané experimentálním měřením. Jako první budou prezentovány výsledky, které odpovídají axiálnímu výstupnímu tělesu s lopatkovou mříží. Následně budou tyto výsledky porovnány s výsledky, které odpovídají samotnému výstupnímu tělesu bez lopatkové mříže.

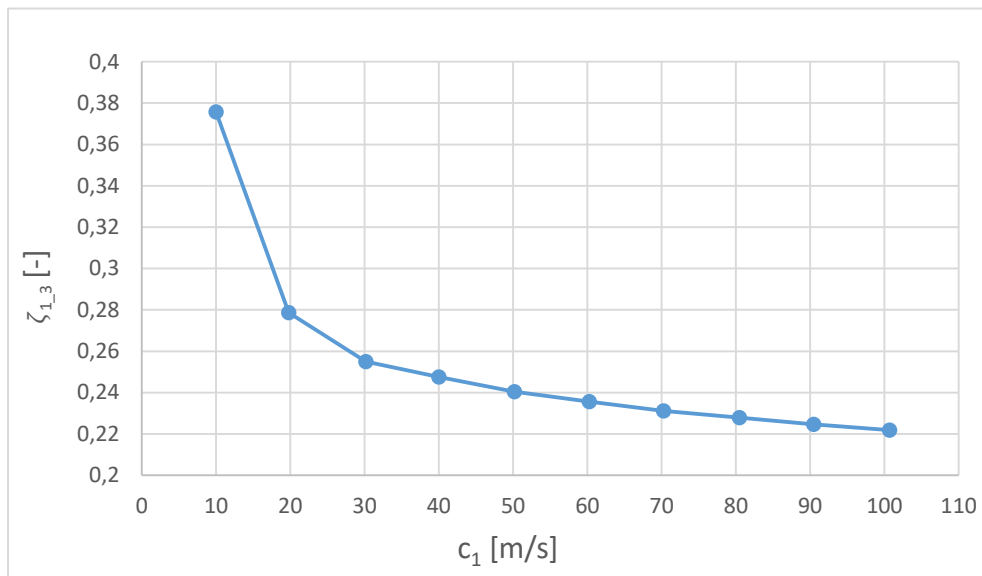
### 13.4.1 Axiální těleso s lopatkovou mříží

Závislost ztrátového součinitele  $\zeta_{1,3}$  a tlakového součinitele  $c_{p1,3}$  na rychlosti proudícího vzduchu je možné pozorovat na obr. 13-4 a obr. 13-5. Je patrné, že s rostoucí rychlostí se snižuje hodnota ztrátového součinitele  $\zeta_{1,3}$ . Výrazný pokles hodnoty ztrátového součinitele nastává především v rozmezí rychlostí  $10 \div 30$  m/s. Snižování hodnoty ztrátového součinitele je doprovázeno zvyšováním hodnoty tlakového součinitele, což vychází ze vztahu (25). Tlakový součinitel  $c_p$  udává schopnost difuzoru přeměnit dynamický tlak vstupujícího proudu na energii tlakovou. Ideální hodnota tlakového součinitele je  $c_p = 1$ , viz kap. 3.2. Této hodnoty však není možné dosáhnout. Velmi často se uvádí teoretická maximální hodnota tlakového součinitele  $c_p$ , která je dána vztahem:

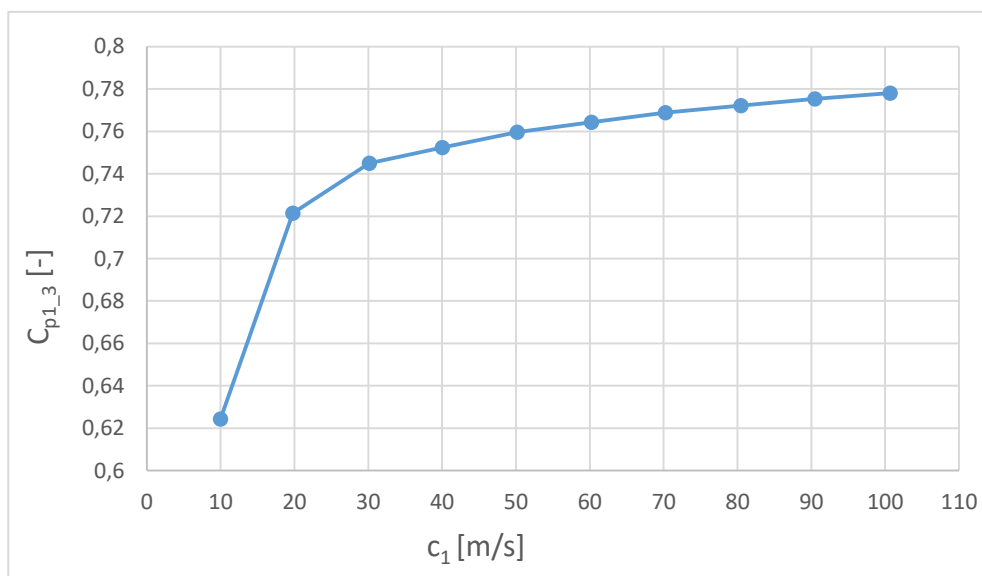
$$c_{p\_max} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2} = 1 - \frac{1}{\left(\frac{243\,231}{95\,798}\right)^2} \cong 0,84. \quad (115)$$

Tlakový součinitel  $c_{p\_max}$  je odvozen pro ideální plyn na základě Bernoulliho rovnice a rovnice spojitosti.

Je zřejmé, že při rychlosti cca 100 m/s došlo k přeměně téměř 78 % dynamického tlaku vstupujícího proudu na energii tlakovou.



Obr. 13-4: Závislost  $\zeta_{1,3}$  na rychlosti  $c_1$



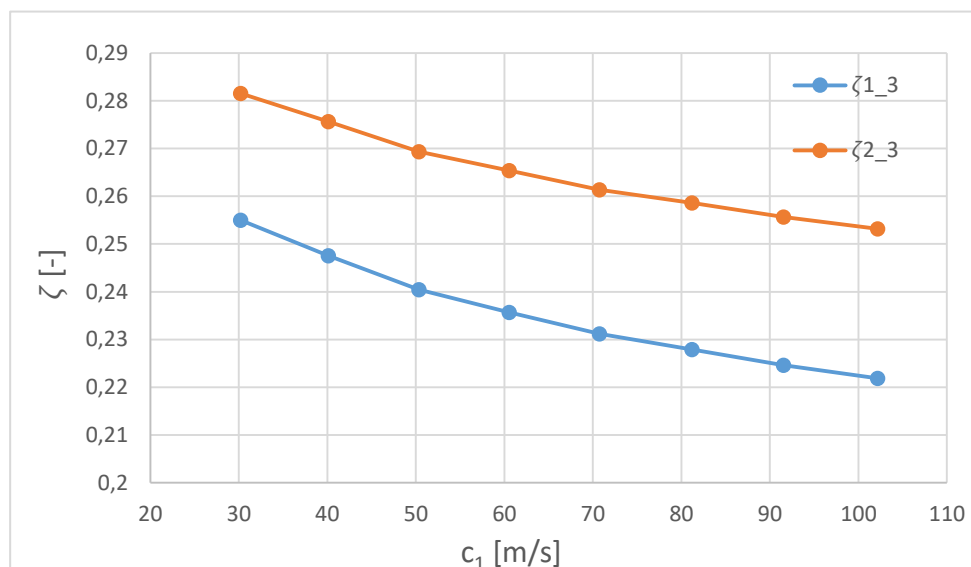
Obr. 13-5: Závislost  $c_{p1,3}$  na rychlosti  $c_1$

### 13.4.2 Axiální těleso bez lopatkové mříže

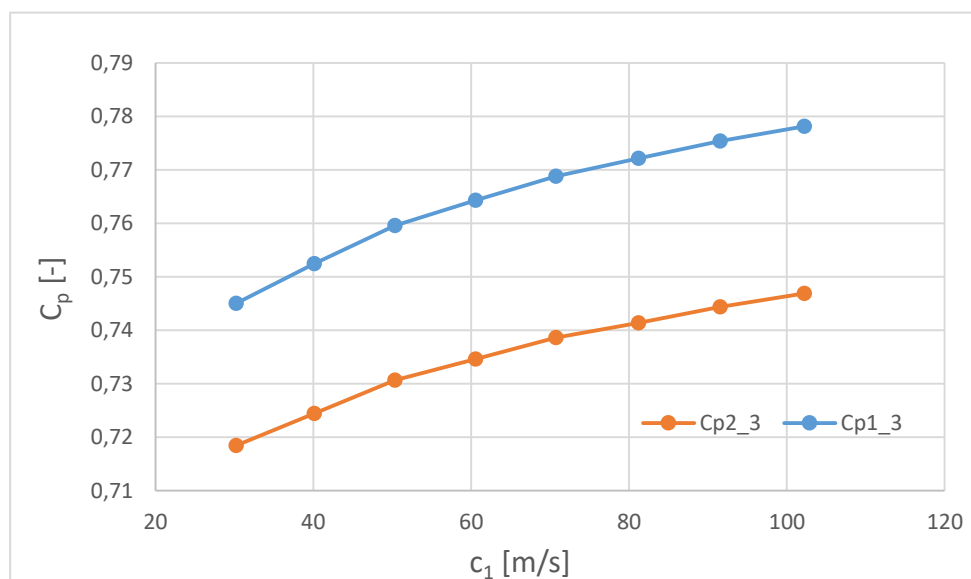
Na obr. 13-6 je porovnávána závislost ztrátového součinitele na rychlosti proudícího vzduchu a na obr. 13-7 je porovnávána závislost tlakového součinitele na rychlosti proudícího vzduchu. Oranžová křivka představuje axiální těleso bez lopatkové mříže a modrá křivka axiální těleso s lopatkovou mříží.

Na začátku difuzoru dosahuje proudění nejvyšší rychlosti a dochází zde k přeměně většiny kinetické energie na energii tlakovou. Směrem k výstupu se účinnost přeměny snižuje. Je patrné, že přítomnost části s lopatkovou mříží má zásadní vliv na sledované veličiny. Lopatková mříž je součástí kuželovitého tvaru difuzoru a podílí se na jeho rozšíření. Při porovnání vstupní a výstupní plochy části s lopatkovou mříží je zřejmé, že toto rozšíření není zanedbatelné. Jinak řečeno, přepočtem do roviny za lopatkovou mříž (rovina 2) se již ve výpočtu ztrátového

součinitele, respektive součinitele  $c_p$ , neprojevil kladný efekt zvýšení statického tlaku vlivem rozšířením průřezu (difuzorový efekt převyšoval místní ztráty lopatkové mříže), což se projevuje zvýšením hodnoty ztrátového součinitele  $\zeta_{2,3}$ .



Obr. 13-6: Závislost  $\zeta$  na rychlosti  $c_1$



Obr. 13-7: Závislost  $c_p$  na rychlosti  $c_1$

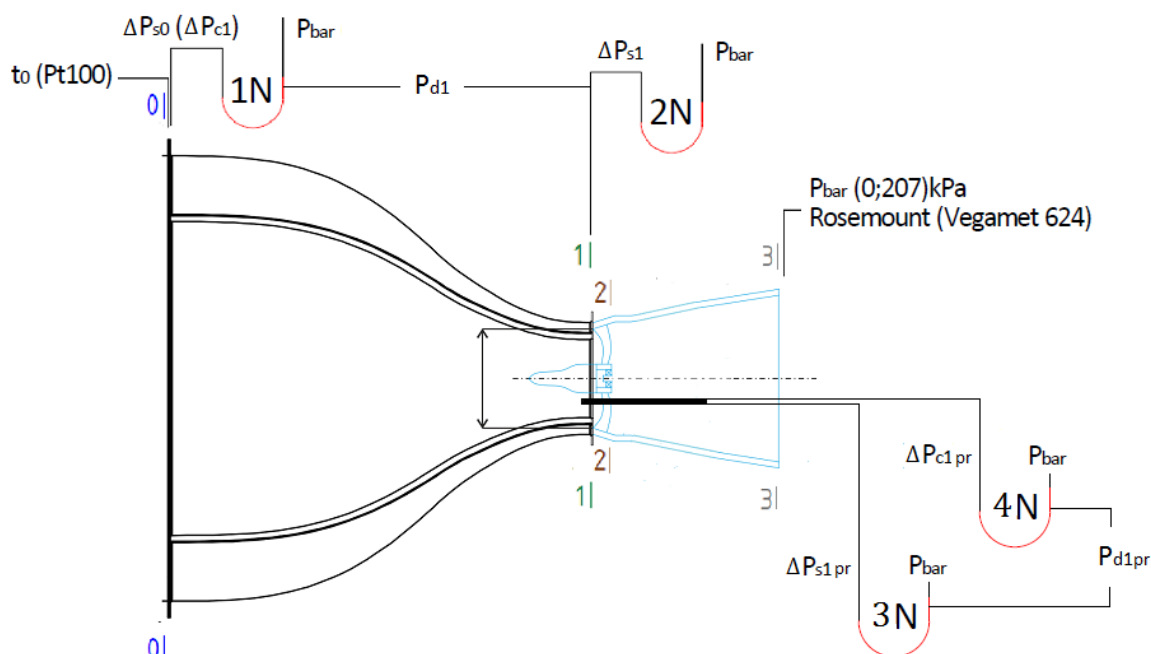
Zvýšení ztrátového součinitele  $\zeta_{2,3}$  je provázáno snížením tlakového součinitele  $c_{p2,3}$ , viz vztah (25). Přeměna dynamického tlaku vstupujícího proudu na energii tlakovou je téměř o 3 % nižší než v případě, kdy difuzor je doplněn o část s lopatkovou mříží, viz obr. 13-7.

### 13.5 Ověření předpokladu

V kap. 11.1 je uvažován předpoklad, že statický tlak v rovině 0 je roven celkovému tlaku v rovině 1. Na základě tohoto zjednodušení je uvažováno  $\Delta p_{s0} = \Delta p_{c0} = \Delta p_{c1}$ . Pro kontrolu uvedeného předpokladu byla do roviny 1 vložena přímá Prandtlova sonda, viz obr. 13-8 a obr. 13-9. Sonda byla umístěna do jednoho referenčního bodu odpovídajícího středu vstupního kanálu. Pomocí této sondy byl měřen celkový tlak  $\Delta p_{c1_{pr}}$  a statický tlak  $\Delta p_{s1_{pr}}$ . Zmíněné veličiny byly měřeny jako difference vůči barometrickému tlaku. Následně byl měřen dynamický tlak  $\Delta p_{d1_{pr}}$  a  $\Delta p_{d1}$  jako difference celkového a statického tlaku. Díky tomu byla zvýšena přesnost měření dynamického tlaku. Všechny tlaky byly měřeny převodníkem NetScanner 9116 s rozsahem 1 psi. Bylo provedeno celkem pět měření pro hladiny otáček od  $500 \div 1\,500$  ot/min.

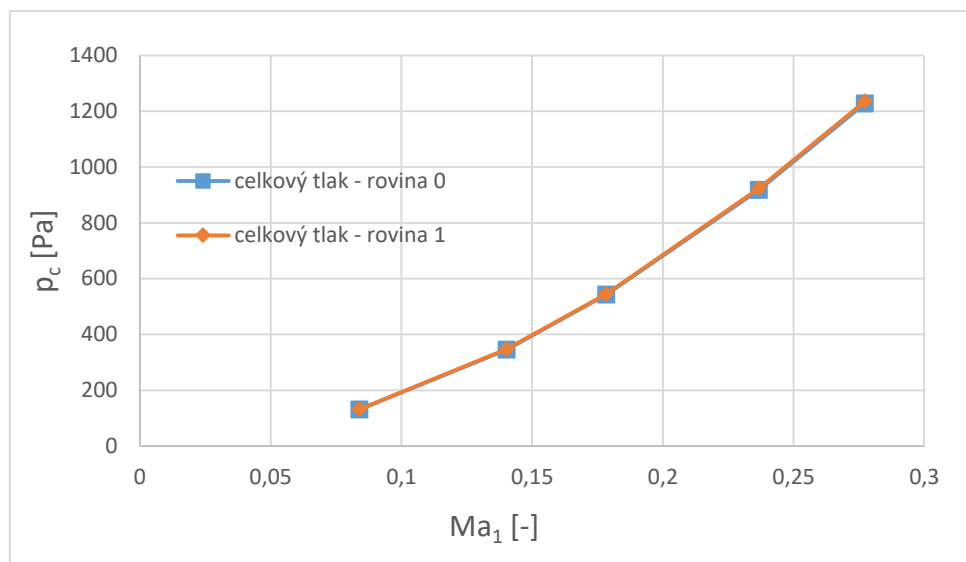


Obr. 13-8: Prandtlova sonda [6]



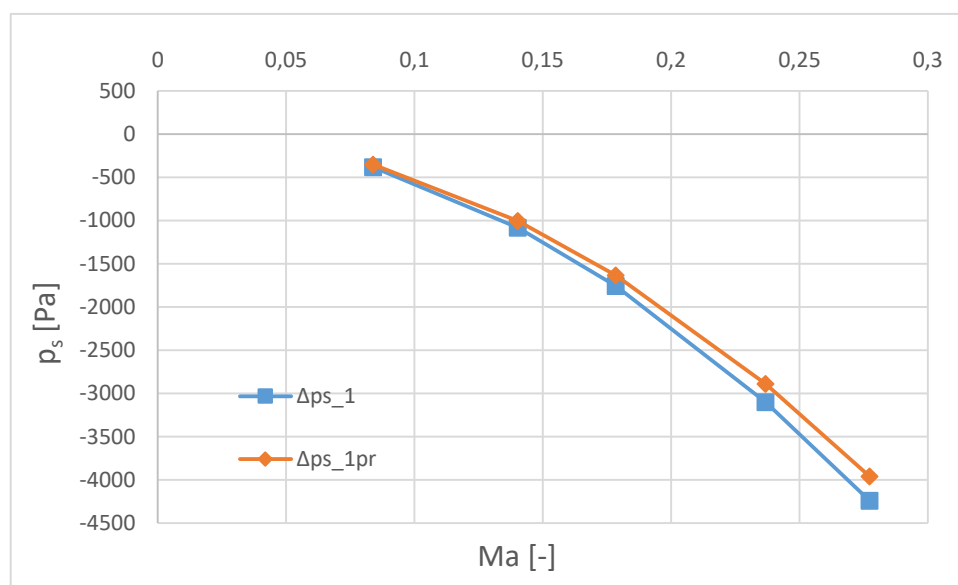
Obr. 13-9: Schéma zapojení – ověření předpokladu

Z obr. 13-10 je zřejmé, že celkový tlak měřený v rovině 0 pomocí čtyř odběrů statického tlaku a celkový tlak měřený přímou Prandtlovo sondou v rovině 1 je prakticky totožný, což vypovídá o regulérnosti použitého předpokladu  $\Delta p_{s0} = \Delta p_{c0} = \Delta p_{c1}$ . Oproti předchozím grafům je zde pro představu vynesena závislost měřeného tlaku na Machově čísle vypočteného dle vztahu (114).



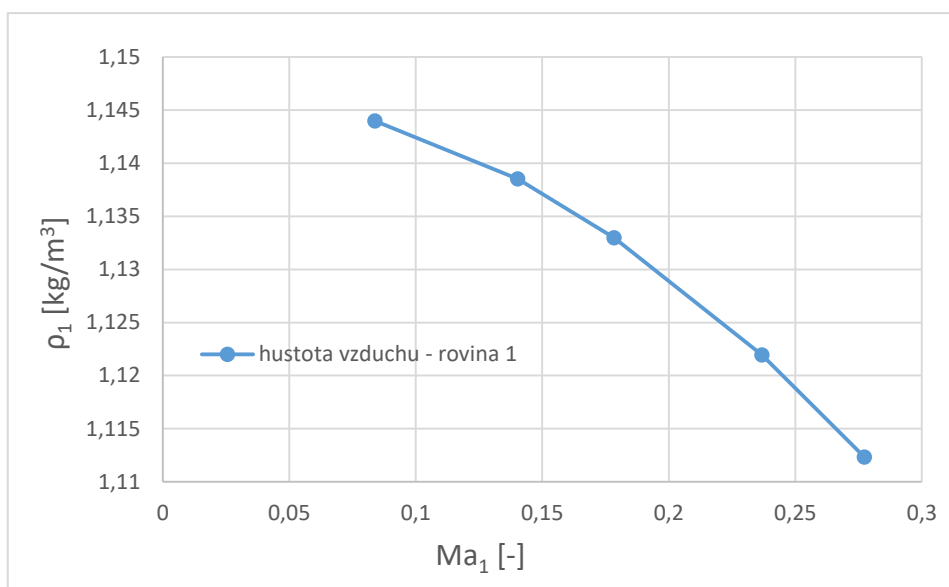
Obr. 13-10: Porovnání celkového tlaku v měřící rovině 0 a 1

Rozdíl mezi statickými tlaky měřenými v rovině 1 je pravděpodobně způsoben tím, že přímá Prandtlova sonda měří tlak pouze v jednom bodě ve středu kanálu, zatímco v druhém případě je tlak získán jako střední hodnota ze čtyř statických odběrů rozmístěných po obvodu kanálu. Rozdíl je však minimální, viz obr. 13-11, což potvrzuje správnost předchozího měření.



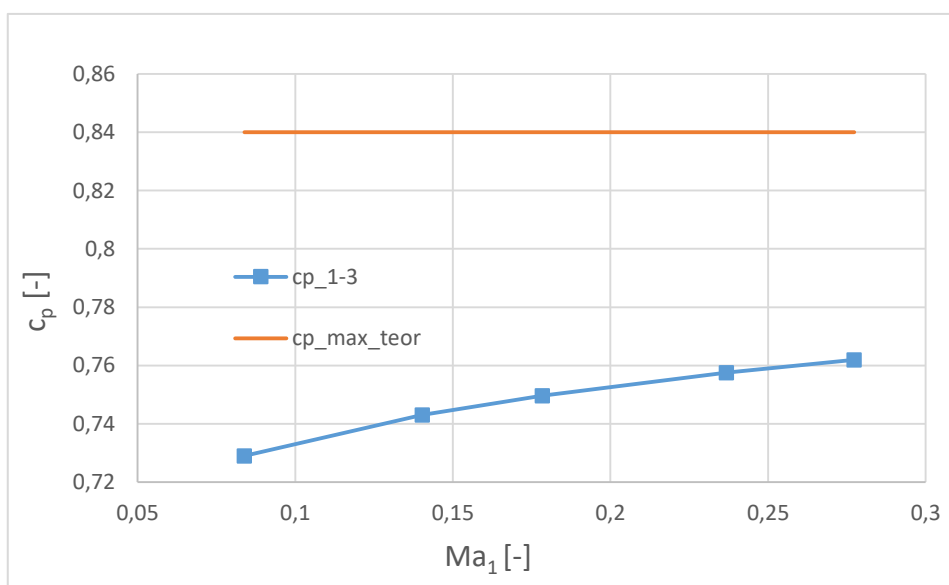
Obr. 13-11: Porovnání statického tlaku

Průběh hustoty proudícího vzduchu v rovině 1 na Machovo čísla je možné pozorovat na obr. 13-12. Je zřejmé, že se zvyšující hodnotou Machova čísla klesá hustota proudícího vzduchu.



Obr. 13-12: Závislost hustoty  $\rho_1$  na Machovo čísla

Z hodnot získaných Prandtlův sondou byla pro ilustraci vyhodnocena závislost tlakového součinitele na Machovo čísla, viz obr. 13-13. Je patrné, že s rostoucí hodnotou Machova čísla, roste i hodnota tlakového součinitele. Tlakový součinitel nabývá hodnot, které odpovídají výsledkům získaným z prvního měření. Díky tomu je možné opět potvrdit regulérnost zavedeného předpokladu. V grafu je také uvedena maximální teoretická hodnota tlakového součinitele, která byla stanovena pomocí rovnice (115).



Obr. 13-13: Závislost tlakového součinitele na Machovo čísla



## 13.6 Získaný výkon

Jak již bylo zmíněno, difuzorová výstupní hrdla jsou důležitou součástí turbostrojů. Připojují se k poslednímu stupni parní turbíny s kondenzátorem. V případě, že je výstupní těleso správně navrženo, dojde ke zvýšení výkonu posledního stupně turbostroje. Získaný výkon je možné stanovit dle vztahu:

$$P = \dot{m} \cdot \frac{c_{ax}^2}{2} \cdot \eta_{td} \cdot (1 - \zeta), \quad (116)$$

kde

- $\dot{m}$  - průtočná hmotnost páry,
- $c_{ax}$  - axiální výstupní rychlost páry,
- $\eta_{td}$  - termodynamická účinnost posledního stupně turbíny.
- $\zeta$  - ztrátový součinitel.

### 13.6.1 Vliv ztrátového součinitele na získaný výkon

Jaký vliv má ztrátový součinitel na získaný výkon, je možné pozorovat v tabulce 13-9. Pro názornost jsou zde uvedeny dvě varianty pro zvolené veličiny. Je zřejmé, že když se sníží hodnota ztrátového součinitele o 0,1, dojde k poměrně značnému nárůstu výkonu. Získaný výkon je téměř o 68 kW vyšší. Získaný výkon závisí na konkrétním stroji a tabulka 13-9 je uvedena jako příklad výpočtu. Je patrné, že ztrátový součinitel má zásadní vliv na získaný výkon. Proto je nezbytné vhodnou geometrií výstupního tělesa zajistit jeho co nejnižší hodnotu.

Tabulka 13-9: Získaný výkon

Varianta	$Ma$ [-]	$\dot{m}$ [kg/s]	$v_{ax}$ [m/s]	$\eta_{td}$ [-]	$\zeta$ [-]	$P$ [kW]	$\Delta P$ [kW]
1	0,45	78,6	157	0,7	0,3	474,7	67,8
2					0,2	542,5	

## 14 Závěr

Hlavním cílem práce bylo uvést do provozu experimentální zařízení pro výzkum axiálních výstupních těles. Nejprve bylo nutné seznámit se s vlastní problematikou proudění v difuzorech. V rešerši byl proveden popis jednotlivých typů difuzorů. Další teorie byla věnována podzvukovým difuzorům a termodynamickým dějům, které byly vysvětleny a znázorněny v  $h - s$  diagramu. Následně byla shrnuta metodika měření ztrátového součinitele výstupního tělesa společně s osazením a oživením měřicí aparatury. Nedílnou součástí této práce byl rozbor nejistot měření jednotlivých sledovaných veličin a následně i samotného ztrátového součinitele. V neposlední řadě byla provedena kalibrace odporového čidla pro měření teploty proudu na vstupu do modelu výstupního tělesa.

Byla provedena první experimentální měření pro variantu prázdného výstupního tělesa, tedy bez veškerých výztuh a podpěr. Tato varianta bude do budoucna sloužit jako varianta referenční. Konstrukční problémy, které nebylo možné ovlivnit, nedovolily ve stanoveném termínu provést měření s různými vestavbami a tvary axiálního tělesa. Měření těchto variant je plánováno na podzim tohoto roku. Měření se uskutečnilo v experimentální laboratoři ve spolupráci se společností DŠPW. Měření bylo provedeno pro několik rychlostí na vstupu do modelu, a to v rozmezí 10 – 100 m/s.

V rámci této práce byla vyhodnocena závislost ztrátového součinitele výstupního tělesa opatřeného stacionární lopatkovou mříží na vstupní rychlosti. Z výsledků je zřejmé, že s rostoucí rychlostí dochází ke snižování hodnoty ztrátového součinitele, respektive k nárůstu součinitele zvýšení tlaku. Pomocí výsledků numerické simulace byly získané experimentální výsledky z měřicí roviny 1 přepočteny do roviny 2. Tímto způsobem bylo možné vyhodnotit ztráty samotného výstupního tělesa bez zahrnutí vlivu lopatkové mříže.

Ztrátový součinitel výstupního tělesa významně ovlivňuje celkový výkon posledního stupně turbíny. Na příkladu bylo ukázáno, že snížením ztrátového součinitele o jednu desetinu lze získat změnu výkonu o desítky kW v závislosti na výkonu stroje a dalších faktorech.

Analýza nejistot měření pro dané měřicí řetězce ukázala, že pro měření teploty je výhodnější použít odporový teploměr (např. Pt100) než termočlánek. Z rozboru nejistot je patrné, že nejistota odporového čidla je o řád nižší než nejistota měření s termočlánekem. Také bylo zjištěno, že zásadní vliv na nejistotu měření má zvolený rozsah měřicí aparatury. Hodnota měřené veličiny by měla ležet v horní třetině rozsahu použitého převodníku. Další poznatek souvisí s počtem členů, které tvoří měřicí řetězec. Snahou je dosáhnout co nejnižšího počtu prvků. Každý prvek totiž způsobuje navýšení nejistoty měření.

Hlavním přínosem práce bylo především shrnutí metodiky měření, osazení měřicí aparatury, její zapojení do měřicích řetězců a získání prvních výsledků, které společně s rozbohem nejistot měření napomohou při plánování dalších variant měření.

## 15 Literatura

- [1] DEJČ, Michail J. *Technická dynamika plynů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1967. Teoretická knižnice inženýra.
- [2] Deych M. E., Zaryankin A. Y.: *Gas Dynamics of diffusers and exhaust ducts of turbomachines, 1970*.
- [3] HIBŠ, Miroslav. *Podzvukové difuzory*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [4] Horský, J. a Horský P. *Snímače a měřicí technika – Měření a jeho vyhodnocení IV: výsledek měření, chyby, nejistoty, specifikace*. AUTOMA, 2015.
- [5] Hoznedl, M. *Difuzorová proudění se specifickými okrajovými podmínkami*. Plzeň.
- [6] Hoznedl M., Sedlák K. *Vliv vestaveb výstupního hrdla parní turbíny na ztráty*. Technická zpráva VZTP 1053, Plzeň 2010.
- [7] *Interní materiály společnosti Doosan Škoda Power s.r.o.*
- [8] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika: učebnice pro vysoké školy*. Praha: Academia, 1973.
- [9] Kalista, Robert. *Experimentální výzkum proudění v modelu NT tělesa pro stupeň M8*. Plzeň, 2015.
- [10] Kreidl, M. *Měření teploty senzory a měřicí obvody*. Praha : BEN-Technická literatura, 2005.
- [11] Mareš, R. a Linhart, J. *Poznámky z přednášek Termomechanika a Mechanika tekutin*. ZČU Plzeň, 2017.
- [12] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Interaktivní statistická analýza dat*. Praha: Karolinum, 2012.
- [13] Odchylky při kalibraci teploměrů v kapalinových lázních a elektrických vertikálních píčkách. AUTOMA, 2009.
- [14] Palenčár, R. a kol. *Nejistoty v měření I*. Bratislava : AUTOMA, 2001.
- [15] Palenčár, R. a kol. *Nejistoty v měření I*. Bratislava : AUTOMA, 2001.
- [16] Sedlák, K. *Odhad nejistot měření teploty při uvažování celého měřicího řetězce*. Technická zpráva TZTP 0886, Plzeň, 2014.
- [17] Sedlák, K. *Odhad nejistot měření tlaku při uvažování celého měřicího řetězce*. Technická zpráva TZTP 0886, Plzeň, 2014.
- [18] *Snímače tlaku – principy, vlastnosti a použití*. AUTOMA, 2007
- [19] TÖLG, Tomáš a Marcel BENDA. *Fyzikální praktikum*. 6. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009.
- [20] Vorel, J. *Experimentální vyšetření místa odtržení proudu od stěny difuzoru*, Plzeň, 2012
- [21] Akademie věd České republiky. [online]. Copyright © Středisko společných činností AV ČR, v. v. i. [Cit. 21. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.avcr.cz/cs/>
- [22] AMETEK CALIBRATION [online]. Copyright ©2015 AMETEK.Inc. All rights reserved. [Cit. 24. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.ametekcalibration.com/>
- [23] Český metrologický institut [online]. [Cit 9. 4. 2017]. Dostupné z: <https://www.cmi.cz/>
- [24] DMT GmbH - Home. *DMT GmbH - Home* [online]. Copyright © 2017 DMT GmbH [Cit. 25. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.dmt-gmbh.com>
- [25] Emerson [Online]. [Cit 10. 5. 2017]. © 2017 Emerson Electric. Dostupné z [www2.emersonprocess.com](http://www2.emersonprocess.com)
- [26] *Fyzika: MEF* [online]. Copyright © 2006 [Cit. 12. 4. 2017]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>

- [27] National Instruments: Testovací, měřicí a integrované systémy - National Instruments. *301 Moved Permanently* [online]. [Cit. 9. 3. 2017]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [28] Plášťový odporový teploměr podle ČSN EN 60751, JUMO Měření a regulace s.r.o., typový list 902210 [online]. [Cit. 5. 4 2017]. Dostupné z: <http://www.jumo.cz>
- [29] *POWER Magazine: Power generation news and jobs in coal, gas, nuclear, renewables* [online]. Copyright © 2017 Access Intelligence, LLC [Cit. 25. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.powermag.com>
- [30] SEVCIK.SF.CZ. [online]. [Cit. 5. 4. 2017]. Dostupné z: <http://mog.wz.cz/>
- [31] Zkoušení stavebních materiálů - nejistota měření. [online]. Copyright © GraFiKh design [Cit. 15. 12. 2016]. Dostupné z: [http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota\\_postup](http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=nejistota_postup)
- [32] Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., *Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill, 2006.

## 16 Seznam obrázků

Obr. 2-1: Tepelný difuzor [5] .....	12
Obr. 2-2: Mechanické difuzory [5] .....	12
Obr. 2-3: Difuzor s měnícím se průtočným množstvím [5] .....	13
Obr. 2-4: Geometrický difuzor [5] .....	13
Obr. 2-5: Základní parametry konického (plochého) difuzoru [5].....	14
Obr. 2-6: Základní parametry kuželového difuzoru [5] .....	14
Obr. 2-7: Základní parametry difuzoru se zakřivenými stěnami [5].....	15
Obr. 3-1: h-s diagram [5].....	17
Obr. 3-2: Označení bodů a řezů důležitých pro termodynamické děje [5] .....	18
Obr. 3-3: Závislost ztrátového součinitele na Machovo číslu [3] .....	19
Obr. 3-4: Možnosti termodynamických dějů [5].....	21
Obr. 3-5: Závislost ztrátového součinitele na Reynoldsově číslu vstupního proudu [3].....	22
Obr. 3-6: Vliv rychlostního pole na ztráty v difuzoru [1] .....	23
Obr. 3-7: Laminární, přechodová a turbulentní mezní vrstva [32] .....	24
Obr. 3-8: Schéma mezní vrstvy na povrchu profilu křídla: a – změna tloušťky a struktury mezní vrstvy podél povrchu profilu: 1 – laminární část vrstvy; 2 – přechodová oblast; 3 – turbulentní část vrstvy; 4 – laminární podvrstva; b – rychlostní profily v různých průřezech vrstvy [1] ..	24
Obr. 3-9: Rychlost a její derivace při záporném tlakovém gradientu [5].....	26
Obr. 3-10: Rychlost a její derivace při kladném tlakovém gradientu [5].....	27
Obr. 3-11: Separáčn <b>í</b> bublina: a – uzavřená, b – otevřená [20].....	27
Obr. 4-1: Typy výstupních hrdel [3] .....	28
Obr. 4-2: Axiální výstupní těleso [29] .....	29
Obr. 5-1: Schéma aerodynamického tunelu [6] .....	30
Obr. 5-2: Aerodynamický tunel s modelem výstupního tělesa [6] .....	31
Obr. 5-3: Komponenty axiálního tělesa [6].....	31
Obr. 6-1: Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření [14] .....	33
Obr. 6-2: Gaussovo rozdělení [31] .....	35
Obr. 7-1: a) Kalibrační pec Ametek RTC 700-B [22], b) schéma kalibrační pece [13] .....	37
Obr. 7-2: Shoda se specifikací [4].....	37
Obr. 8-1: Příklad zapojení Pt100 do měřícího řetězce [9].....	40
Obr. 8-2: Schéma termočlánu [26].....	41
Obr. 8-3: Schéma měření teploty pomocí termočlánu s převodníkem NI 9214 [9].....	43
Obr. 8-4: Závislost nejistoty převodníku NI 9214 na teplotě [9] .....	44
Obr. 9-1: Snímač tlaku Rosemount [25] .....	45

Obr. 9-2: Kapacitní čidlo: a) princip, b) schéma [18] .....	46
Obr. 9-3: Schéma měřicího řetězce s A/D převodníkem [9].....	47
Obr. 9-4: Schéma měřicího řetězce – Rosemount 3051S [9].....	49
Obr. 9-5: NetScanner 9116 [24].....	50
Obr. 9-6: Schéma měřicího řetězce – NetScanner 9116 .....	50
Obr. 10-1: Schéma zapojení .....	52
Obr. 10-2: Schéma zapojení měřicích členů .....	53
Obr. 11-1: Závislost $\zeta_m$ na rychlosti $c_1$ .....	56
Obr. 11-2: Závislost $p_p$ na rychlosti $c_1$ .....	56
Obr. 12-1: Odběr statického tlaku [9] .....	59
Obr. 13-1: Histogram celkového tlaku $\Delta p_{c1}$ .....	60
Obr. 13-2: Q-Q plot celkového tlaku $\Delta p_{c1}$ .....	61
Obr. 13-3: Potvrzení shody se specifikací.....	62
Obr. 13-4: Závislost $\zeta_{1_3}$ na rychlosti $c_1$ .....	67
Obr. 13-5: Závislost $cp_{1_3}$ na rychlosti $c_1$ .....	67
Obr. 13-6: Závislost $\zeta$ na rychlosti $c_1$ .....	68
Obr. 13-7: Závislost $cp$ na rychlosti $c_1$ .....	68
Obr. 13-8: Prandtlova sonda [6] .....	69
Obr. 13-9: Schéma zapojení – ověření předpokladu .....	69
Obr. 13-10: Porovnání celkového tlaku v měřicí rovině 0 a 1 .....	70
Obr. 13-11: Porovnání statického tlaku.....	70
Obr. 13-12: Závislost hustoty $\rho_1$ na Machovo čísle.....	71
Obr. 13-13: Závislost tlakového součinitele na Machovo čísle .....	71

## 17 Seznam tabulek

Tabulka 7-1: Chyba stability nastavené teploty [22] .....	38
Tabulka 7-2: Chyba vlivem axiální homogenity [22] .....	38
Tabulka 8-1: Toleranční třídy přesnosti dle ČSN EN 60 751 .....	39
Tabulka 8-2: Odhad nejistoty měření karty NI 9217 [27].....	40
Tabulka 8-3: Typy termočlánků podle jejich složení.....	42
Tabulka 8-4: Toleranční třídy pro jednotlivé typy termočlánků, viz ČSN IEC 584-2.....	42
Tabulka 8-5: Odhad nejistoty měření karty NI 9214 [27].....	43
Tabulka 10-1: Přehled měřených veličin .....	52
Tabulka 13-1: Ověření shody se specifikací .....	61
Tabulka 13-2: Odhad nejistoty měření teploty – Pt100 .....	63
Tabulka 13-3: Odhad nejistoty měření – termočlánek K .....	63
Tabulka 13-4: Odhad nejistoty měření absolutního tlaku – Rosemount 3051S.....	64
Tabulka 13-5: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 0 – NetScanner 9116.....	65
Tabulka 13-6: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 1 – NetScanner 9116 (rozsah 15 psi).....	65
Tabulka 13-7: Odhad nejistoty měření statického tlaku v rovině 1 – NetScanner 9116 (rozsah 1 psi).....	65
Tabulka 13-8: Odhad nejistoty měření ztrátového součinitele $\zeta_{1_3}$ .....	66
Tabulka 13-9: Získaný výkon .....	72