



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ENERGETICKÝ ÚSTAV**

ENERGY INSTITUTE

**VLIV NASTAVENÍ VENTILACE NA MNOŽSTVÍ  
PŘIVÁDĚNÉHO VZDUCHU A JEHO DISTRIBUCI V  
KABINĚ AUTOMOBILU**

THE EFFECT OF THE VENTILATION SETTINGS ON AMOUNT OF FED AIR AND ITS DISTRIBUTION IN THE  
CAR CABIN

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Filip Poláček**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Pokorný, Ph.D.**

**BRNO 2016**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Filip Poláček**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Technika prostředí  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Pokorný, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Prostředí v kabinách automobilů je ve značné míře závislé na nastavení ventilace, která dodává upravený vzduch do kabiny. Správně nastavená ventilace poskytuje nejen tepelný komfort, ale souvisí i s bezpečností jízdy (např. odmlžování skel). Řidič během jízdy by měl mít možnost nastavit podmínky prostředí dle svých potřeb nezávisle na okolních klimatických podmínkách. K splnění tohoto požadavku je nutné, aby ventilační systém byl schopen poskytovat vhodně upravený vzduch a také jej vhodně směřovat do prostoru kabiny. Tato práce se zabývá určením množství přiváděného vzduchu do kabiny a měřením distribuce vzduchu výstky do kabiny automobilu v závislosti na nastavení ovládacích prvků HVAC systému. Množství přiváděného vzduchu lze vypočítat pomocí tlakové charakteristiky ventilátoru a potrubní sítě, které budou experimentálně určeny. Tj. bude určena korelace mezi měřenou tlakovou diferencí na ventilátoru a objemovým průtokem čerstvého vzduchu pro různé provozní podmínky. Výsledky této práce bude možné použít jako podklad pro matematický model vnitřního prostředí kabiny automobilu.

### **Cíle diplomové práce:**

- 1) Změřit množství vzduchu přiváděného do kabiny a jeho vnitřní distribuci pro různá nastavení ovládacích prvků (např. režim větrání, otáčky ventilátoru).
- 2) Určit korelaci mezi měřenou tlakovou diferencí na ventilátoru a objemovým průtokem čerstvého vzduchu.
- 3) Zpracovat získané výsledky do podoby tak, aby mohli být použity jako podklad pro matematický model vnitřního prostředí kabiny automobilu.

### **Seznam literatury:**

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

Daly, S. (2006): Automotive Air-Conditioning and Climate Control Systems. Elsevier Ltd., Oxford.

Gscheidle, R., a kol. (2007): Příručka pro automechanika, 3. přepracované vydání. Europa - Sobotáles, Praha.

Chyský J., Hemzal, K., a kol. (1993): Větrání a klimatizace. BOLIT – B press, Brno.

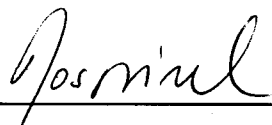
Pavelek, M., Štětina, J. (2007): Experimentální metody v technice prostředí. Akademické nakladatelství CERM, Brno.

Stubblefield, M., Haynes, J. (2000): Haynes Techbook: Automotive Heating & Air Conditioning. Haynes Publishing Group, England.

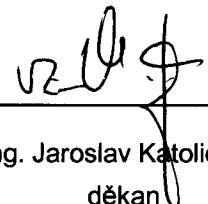
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 27. 11. 2015





doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá měřením rozložení distribuce a množství přiváděného vzduchu do kabiny automobilu při různých venkovních podmínkách a nastavení klimatizace. Pro určení množství přiváděného vzduchu do kabiny automobilu byla zhotovena charakteristika ventilátoru. Měření bylo provedeno pomocí rychlostních sond v klimatické komoře, kde bylo možné simulovat různé venkovní podmínky. Z měření vyplývá závislost rozložení distribuce vzduchu na teplotě venkovního prostředí. Diplomová práce přináší podklady pro zpracování matematického modelu kabiny automobilu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

průtok, klimatizace, distribuce vzduchu, charakteristika ventilátoru

## ABSTRACT

This thesis deals with measuring of the distribution and volume of intake air inside vehicle cockpit under varying outdoor conditions and air conditioning settings. Fan characteristic was developed to determine the volume of air taken inside the cockpit. The measuring was made using speed probes in climatic chamber, where different outdoor conditions could be simulated. Following the measurements there is dependence between the air distribution and the outside temperature. The diploma thesis presents source materials to develop a mathematical model of car cabin.

## KEY WORDS

flow, air conditioning, air distribution, characteristic fan



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁČEK, F. *Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D..



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

-----  
Datum

-----  
Filip Poláček



## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Pokornému Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

Současně bych chtěl poděkovat své rodině za podporu, kterou mi po celou dobu mého studia poskytli.



## OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>13</b>
<b>1 VĚTRÁNÍ, VYTÁPĚNÍ A CHLAZENÍ KABINY AUTOMOBILU...</b>	<b>15</b>
1.1 VĚTRÁNÍ.....	15
1.2 VYTÁPĚNÍ.....	16
1.3 CHLAZENÍ.....	17
<b>2 PROUDĚNÍ VZDUCHU Z VYÚSTEK</b> .....	<b>19</b>
2.1 ROZDĚLENÍ PROUDŮ .....	19
2.2 POPIS PROUDU.....	20
<b>3 PRŮTOK A JEHO MĚŘENÍ</b> .....	<b>23</b>
3.1 PRŮTOK .....	23
3.2 ROZDĚLENÍ PRINCIPŮ MĚŘENÍ PRŮTOKU .....	25
3.3 MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ TLAKOVÉ DIFERENCE.....	25
3.4 MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ MĚŘENÍ OBJEMU .....	28
3.5 MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ ODPOROVÝCH TĚLÍSEK .....	31
3.6 MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ KALORIMETRIE .....	31
3.7 MĚŘENÍ PRŮTOKU POMOCÍ MĚŘENÍ RYCHLOSTI .....	32
<b>4 MĚŘENÍ RYCHLOSTI</b> .....	<b>35</b>
4.1 MECHANICKÉ ANEMOMETRY .....	35
4.2 TERMOANEMOMETRY .....	36
4.3 DYNAMICKÉ RYCHLOSTNÍ SONDY .....	39
<b>5 NEJISTOTA MĚŘENÍ</b> .....	<b>41</b>
5.1 NEJISTOTA TYPU A .....	42
5.2 NEJISTOTA TYPU B.....	42
5.3 NEJISTOTA NEPŘÍMO MĚŘENÉ VELIČINY.....	42
<b>6 CHARAKTERISTIKY VENTILÁTORU</b> .....	<b>43</b>
6.1 PRINCIP MĚŘENÍ CHARAKTERISTIKY VENTILÁTORU .....	43
<b>7 MĚŘENÍ DISTRIBUCE VZDUCHU PŘI RŮZNÉM NASTAVENÍ HVAC</b> .....	<b>51</b>
7.1 VLIV NASTAVENÍ OTÁČEK VENTILÁTORU NA DISTRIBUCI VZDUCHU .....	52
7.2 VYBRANÁ NASTAVENÍ A KLIMATICKÉ PODMÍNKY PRO MĚŘENÍ .....	55
7.3 OZNAČENÍ VYÚSTEK .....	55
7.4 MĚŘENÍ HMOŤNOSTNÍHO PRŮTOKU VYÚSTKAMI.....	57
7.5 SHRNUTÍ POSTUPU MĚŘENÍ V KABINĚ AUTOMOBILU .....	58
7.6 VLIV NASTAVENÍ A KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA DISTRIBUCI.....	58
<b>8 USPOŘÁDÁNÍ DAT PRO MATEMATICKÝ MODEL</b> .....	<b>63</b>
8.1 CHARAKTERISTIKA VENTILÁTORU .....	63
8.2 ROZLOŽENÍ DISTRIBUCE VZDUCHU .....	63

<b>9</b>	<b>POUŽITÁ TECHNIKA</b> .....	<b>65</b>
9.1	KLIMATICKÁ KOMORA .....	65
9.2	AUTODIAGNOSTIKA VAG - COM .....	65
9.3	MĚŘENÍ RYCHLOSTI .....	66
9.4	MĚŘENÍ TLAKOVÉ DIFERENCE .....	67
9.5	KALIBRACE SOND .....	68
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>73</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>75</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>77</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>79</b>
	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>81</b>

## ÚVOD

Pohoda prostředí je jedním z podstatných parametrů ovlivňující pozornost, soustředěnost a produktivitu práce a celkovou spokojenost lidí ve vnitřním prostředí. Přesto, že její vnímání je velmi subjektivní, lze ji statisticky vyjádřit podílem nespokojených z větší skupiny lidí. Lze ji rozdělit na podskupiny, například tepelná pohoda (tepelný komfort), světelná pohoda, akustická apod. Tepelná pohoda je významnou částí ovlivňující vnímání pohody prostředí. „*Tepelný komfort je stav mysli vyjadřující uspokojení s tepelným prostředím*“ [1]. Hlavními faktory prostředí, které ovlivňují tepelnou pohodu, jsou teplota a vlhkost vzduchu, radiační teplota stěn a rychlost proudění vzduchu v okolí člověka.

Požadavky na pohodlné prostředí jsou kladeny nejen v budovách, ale i v dopravních prostředcích, automobily nevyjímaje. Stav vnitřního prostředí kabiny automobilu má značný vliv na psychiku řidiče a lze jej zařadit mezi aktivní prvky bezpečnosti. V kabinách automobilů lze přímo ovlivňovat teplotu a rychlost proudění vzduchu pomocí nastavení HVAC systému (heating, ventilating and air conditioning)(vytápění, větrání a klimatizace). Na tepelný komfort v kabině automobilu nemá vliv pouze teplota a množství přiváděného vzduchu, ale také jeho distribuce do prostoru kabiny.

Už od začátku minulého století byla snaha vytvořit vhodné podmínky pro posádku. Na počátku nebyla dostupná technologie, která by umožňovala sofistikovanou úpravu tepelného komfortu v automobilu po celý rok. První klimatizace pro automobily byla dostupná v roce 1939. V této době se jednalo spíše o výjimečné použití. Masově dostupná klimatizace byla až mezi lety 1954 – 1955. [2]

V této diplomové práci se zaměříme na vliv nastavení HVAC systému na množství a distribuci přiváděného vzduchu do kabiny automobilu. Vliv nastavení budeme posuzovat na automobilu ŠKODA Octavia. Tento automobil je vybaven klimatizačním systémem Climatronic, který může fungovat v automatickém režimu, kdy řídicí jednotka systému nastavuje teplotu, množství a rozložení distribuce vzduchu podle údajů z čidel, kterými je automobil vybaven. V této práci budeme posuzovat vliv manuálního nastavení na distribuci přiváděného vzduchu. Naměřené hodnoty budou sloužit pro numerický model kabiny automobilu.

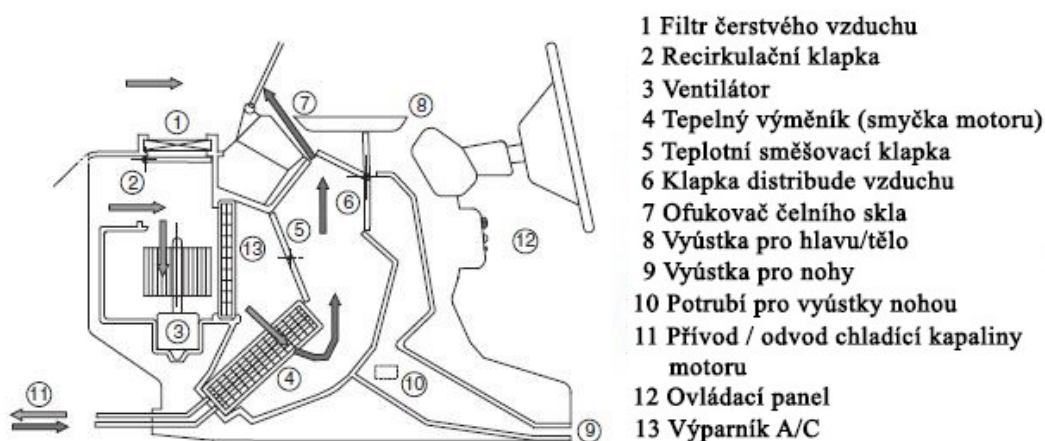
Dále se zaměříme na určení tlakové charakteristiky ventilátoru. Na základě této charakteristiky bude možné jednodušeji stanovovat množství přiváděného vzduchu do kabiny.

V prvních kapitolách práce je uveden přehled problematiky týkající se klimatizování kabiny a způsobů měření průtoků vzduchu. Větší pozornost je pak věnována metodě měření průtoků na základě měření rychlosti proudění, která byla použita v praktické části práce.



# 1 Větrání, vytápění a chlazení kabiny automobilu

V této kapitole se zaměříme na popis jednotlivých funkcí HVAC systému instalovaného v automobilu, ve kterém bude provedeno měření distribuce vzduchu. Jedná se o automobil ŠKODA Octavia 3. generace, který je využíván na OTTP (Odbor termomechaniky a techniky prostředí) pro experimentální měření. Obecné schéma jakým způsobem funguje vytápění, větrání a chlazení v automobilu je na Obr. 1.



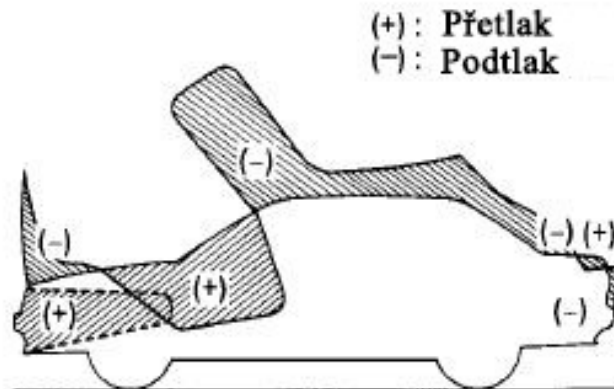
Obr. 1 Schéma HVAC [2]

## 1.1 Větrání

Posádka vozidla produkuje škodliviny, které ovlivňují kvalitu vnitřního prostředí. Jedná se například o  $\text{CO}_2$  vylučované při dýchání nebo také škodlivé produkty kouření. Pro mírnou aktivitu se jedná o 19 l/h  $\text{CO}_2$  na osobu. Pokud by kabina nebyla větrána, koncentrace  $\text{CO}_2$  by přesáhla přijatelnou hodnotu 1000-2000 ppm. Lidské tělo nedokáže rostoucí množství  $\text{CO}_2$  přímo zaznamenat. Při zvýšené koncentraci  $\text{CO}_2$  přichází únava, nepozornost a v extrémních případech při koncentraci  $>40000$  ppm lidé mohou omdlít. [3]

Větrání zajišťuje přívod čerstvého vzduchu do kabiny a odvod znečištěného vzduchu do okolí v zadní části automobilu. Tato výměna by měla probíhat bez vzniku průvanu, který zhoršuje pohodlí posádky. Výměna může probíhat přirozeně rozdílem tlaků, který vzniká pohybem automobilu nebo při nízkých rychlostech pomocí ventilátoru, který je součástí větracího systému. Tlakové poměry při jízdě automobilu jsou zobrazeny na Obr. 2. [2]

Přiváděný vzduch před vstupem do kabiny nejprve prochází vzduchovým filtrem, kde je zbaven nečistot, dále ventilátorem, který pomáhá při nízkých rychlostech a poté sítí až k vyústkám v kabině automobilu. Poté, co projde kabinou, odchází otvorem v zadní části automobilu. V okruhu bývá také zabudován snímač kvality vzduchu, který má za úkol kontrolu množství škodlivin. Například v pomalu jedoucí koloně nebo při jízdě v tunelu může být vhodnější pouze recirkulace vzduchu. [2]

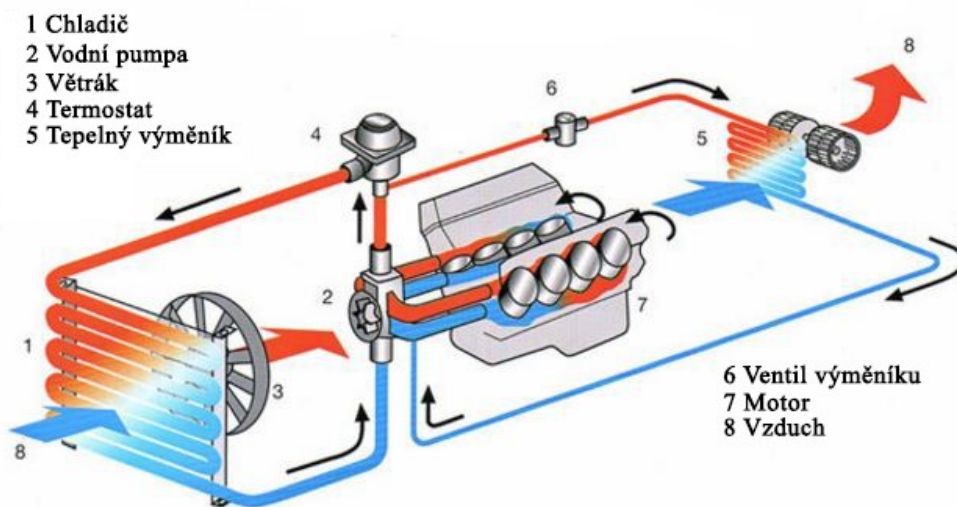


Obr. 2 Tlakové poměry při jízdě automobilu [2]

## 1.2 Vytápění

K ohřevu přiváděného vzduchu dochází na teplosměnné ploše výměníku chladicí smyčky motoru, která je na Obr. 3. Teplo, které vzniká při spalování v motoru automobilu, je odváděno vodní chladicí smyčkou motoru přes chladič automobilu (Obr. 3 bod 1), který je ofukován větrákem (Obr. 3 bod 3). Pokud je potřeba v kabině automobilu zvýšit teplotu, může být část tepla přiváděna pomocí tepelného výměníku (Obr. 3 bod 5), (Obr. 1 bod 4) do kabiny automobilu.

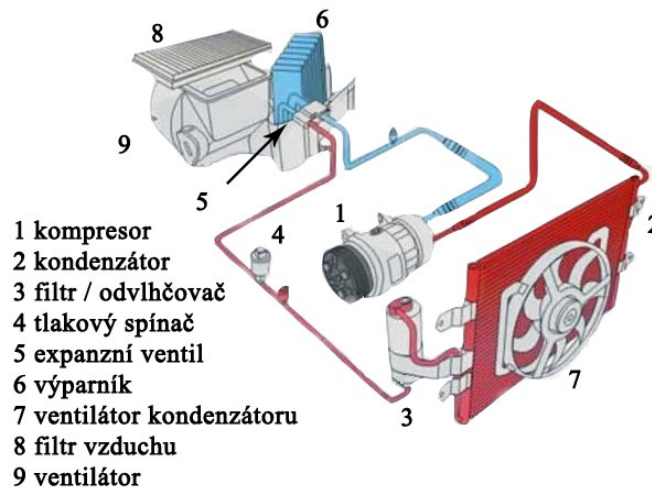
Intenzitu vytápění lze měnit dvěma způsoby. První způsob je omezení průtoku kapaliny výměníkem, kdy regulační ventil (Obr. 3 bod 6) mění průtok kapaliny v tepelném výměníku (Obr. 3 bod 5). Tato metoda je pro regulaci pomalá. Nebo lze použít druhou metodu, která využívá klapku před výměníkem tepla. Klapka odkloní část vzduchu mimo teplosměnnou plochu. [2]



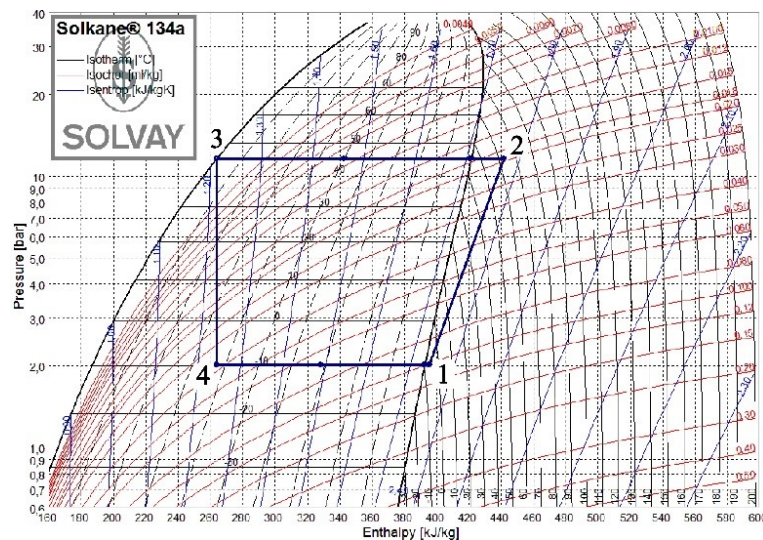
Obr. 3 Schéma chladicí smyčky motoru automobilu [4]

### 1.3 Chlazení

Při chlazení prochází nasávaný vzduch přes filtr, ventilátor a výparník chladivového okruhu (Obr. 4 body 8, 9, 6) a vstupuje do kabiny automobilu. K popisu cyklu chladiva slouží Obr. 4 a Obr. 5. Plynné chladivo je nasáváno kompresorem (Obr. 3 bod 1) a probíhá komprese mezi body 1 – 2 (Obr. 4). Při kompresi roste tlak a teplota po kompresi je vyšší než teplota okolního vzduchu. Následně plynné chladivo prochází kondenzátorem (Obr. 4 bod 2) a mezi body 2-3 předává teplo (Obr. 5) v kondenzátoru vzduchu a kondenzuje. Kapalně chladivo prochází filtrem a odvlhčovačem (Obr. 4 bod 3). Následně vstupuje do expanzního ventilu (Obr. 4 bod 5), kde probíhá expanze, při které klesá tlak chladiva a tím i vypařovací teplota. Vzduch procházející výparníkem má vyšší teplotu než je výparná teplota chladiva. Chladivo k vypaření potřebuje teplo, které odebírá okolnímu vzduchu, který následně vstupuje do prostoru kabiny automobilu. Plynné chladivo je znovu nasáváno kompresorem a cyklus se opakuje.



Obr. 4 Schéma okruhu chlazení [5]



Obr. 5 Cyklus chladiva v p-h diagramu



## 2 Proudění vzduchu z vyústek

Jedním z cílů této diplomové práce je určení poměrů průtoků vzduchu z jednotlivých vyústek v automobilu. V následující kapitole se zaměříme na teoretický základ proudění vzduchu z vyústek do prostoru.

### 2.1 Rozdělení proudů

Proudy z vyústek jsou hodnoceny podle dvou základních hledisek. Prvním hlediskem je omezenost proudu překážkami v místnosti, do které proud vstupuje a dělíme proudy na *volné proudy* (stěny a překážky v místnosti jsou dostatečně daleko a neovlivňují proud) a *proudy omezené* (stěny, překážky ovlivňují proudění). Druhým hlediskem je rozdíl teplot mezi teplotou proudu a teplotou prostředí. Pokud je teplota proudu vyšší než teplota prostředí, proud stoupá vzhůru, v opačném případě klesá dolů. Podle tohoto hlediska lze proudy rozdělit na proudy izotermní a neizotermní. O stupni neizotermičnosti rozhoduje poměr sil vztakových k silám setrvačným. Tento poměr hodnotí Archimédovo číslo, které pro vyústku vypočítáme podle vztahu (2.1). [6]

$$Ar_0 = \frac{gl_0|T_0 - T_i|}{w_0^2 T_i} \quad (2.1)$$

Neizotermní proudy můžeme podle Archimédova čísla rozdělit na:

- Slabě neizotermní proud  $Ar_0 \leq 0,001$
- Neizotermní proud  $0,001 \leq Ar_0 \leq 0,01$
- Silně neizotermní proud  $Ar_0 > 0,01$

Kde:

$g$  ... gravitační zrychlení [ $\text{kg/m}^3$ ]

$l_0$  ... charakteristický rozměr vyústky [ $\text{m}^2$ ]

$T_0$  ... teplota vzduchu ve vyústí [K]

$T_i$  ... teplota vzduchu v prostoru [K]

$w_0$  ... rychlost ve vyústí [m/s]



V hlavní oblasti proudu lze vypočítat osovou rychlost  $w_x$  ve vzdálenosti  $x$  od pólu pomocí poměrné osové rychlosti která je popsána vztahem (2.2)

$$\frac{w_x}{w_0} = K_S \frac{\sqrt{S_0}}{x} \quad (2.2)$$

Kde:

$w_x$  ... rychlost proudu ve vzdálenosti  $x$  [m/s]

$w_0$  ... rychlost proudu u vyústky [m/s]

$K_S$  ... konstanta vyústky [-]

$S_0$  ... plocha proudu [m<sup>2</sup>]

$x$  ... vzdálenost od pólu [m]

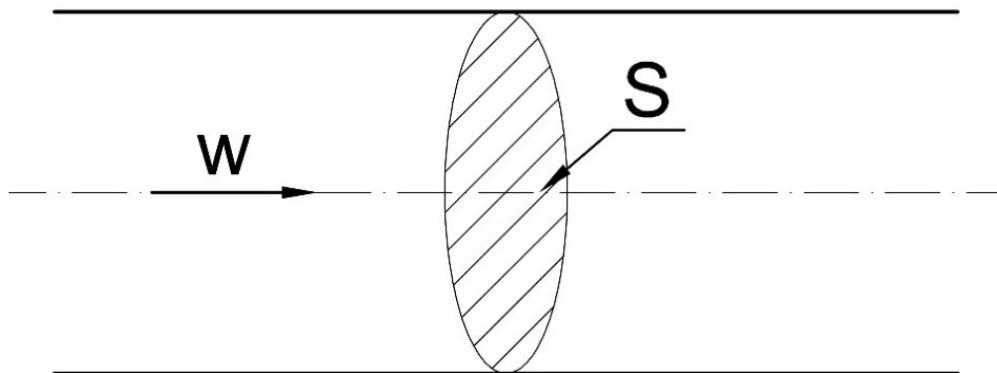


### 3 Průtok a jeho měření

V této diplomové práci se zabýváme měřením průtoku vzduchu. V následující kapitole popíšeme definici objemového a hmotnostního průtoku a možnosti jejich měření při proudění plynů.

#### 3.1 Průtok

Průtok je označení objemu nebo hmotnosti za jednotku času. V souvislosti s průtokem je často zmíněno i *proteklé množství*, které slouží například k vyúčtování nákladů za pitnou vodu nebo plyn.



Obr. 7 Označení veličin při proudění

**Objemový průtok** je objem za jednotku času. V technické praxi se používá jak základní jednotka metry krychlové za sekundu [ $\text{m}^3/\text{s}$ ], tak i odvozené například metry krychlové za hodinu [ $\text{m}^3/\text{hod}$ ], nebo litry za sekundu [ $\text{l/s}$ ]. [8] [9] [10]

$$\dot{Q}_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Má-li proud plochu  $S$  [ $\text{m}^2$ ] a střední rychlost  $\bar{w}$  [ $\text{m/s}$ ] tak za přírůstek času  $\Delta t$  je objem roven

$$\Delta V = S\bar{w}\Delta t \quad (3.2)$$

Následně rovnice (3.1) lze upravit do tvaru

$$\dot{Q}_v = S\bar{w} \quad (3.3)$$

**Hmotnostní průtok** je hmotnost za jednotku času. Základní jednotkou je kilogram za sekundu [kg/s]. [9] [10]

$$\dot{Q}_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (3.4)$$

Má-li proud objem  $\Delta V$  [m<sup>3</sup>] a hustotu  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], tak hmotnost je rovna

$$\Delta m = S\bar{w}\Delta t\rho \quad (3.5)$$

následně rovnice (3.4) lze upravit do tvaru

$$\dot{Q}_m = S\bar{w}\rho \quad (3.6)$$

Následnou kombinací rovnic (3.6) a (3.3) dostáváme vztah pro přepočet toku objemového na hmotnostní

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_v\rho \quad (3.7)$$

**Výpočet hustoty** lze provést úpravou stavové rovnice (3.8) pro ideální plyn, která dává do vztahu základní stavové veličiny plynu. Mezi tyto veličiny patří tlak [Pa], teplota [K] a měrný objem [m<sup>3</sup>/kg].

$$pv = rT \quad (3.8)$$

Měrný objem lze nahradit vztahem (3.9) a pro výpočet hustoty dostáváme rovnici (3.10)

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (3.9)$$

$$\rho = \frac{p}{rT} \quad (3.10)$$

Kde:

$\rho$  ... hustota [kg/m<sup>3</sup>]

$p$  ... tlak [Pa]

$r$  ... měrná plynová konstanta ideálního plynu [J/kgK]

$T$  ... teplota [K]

**Proteklé množství** je celkové množství tekutiny, které proteklo, za daný časový usek. Z objemového průtoku lze vypočítat objem proteklé tekutiny podle rovnice (3.11) podobně tak z hmotnostního průtoku lze vypočítat hmotnost podle rovnice (3.12) [9]

$$Q_V = \int_0^{\Delta t} \dot{Q}_v dt \quad (3.11)$$

$$Q_m = \int_0^{\Delta t} \dot{Q}_m dt \quad (3.12)$$

### 3.2 Rozdělení principů měření průtoku

- **Podle principu lze základní metody rozdělit na :**
  - měření tlakové difference před a za vloženým prvkem
  - měření objemová
  - měření odporovými tělisky
  - měření průtoku pomocí kalorimetrie
  - měření rychlostí
- **Mezi další metody patří :**
  - měření Coriolisových sil
  - měření pomocí ultrazvuku
  - měření víru za překážkou

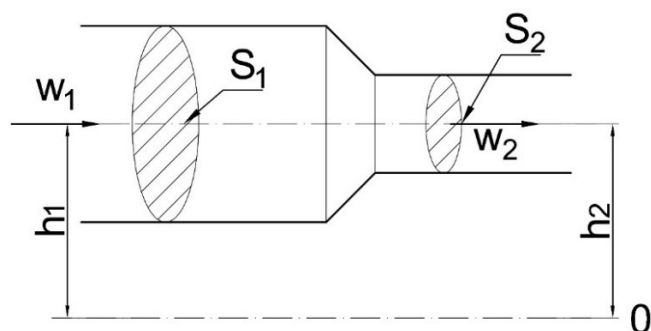
### 3.3 Měření průtoku pomocí tlakové difference

Tyto průtokoměry pracují na principu měření tlakové difference, která vzniká průtokem tekutiny vloženým prvkem. Rozměry a způsob měření popisuje norma ČSN ISO 5167-1. Tlakové poměry popisuje Bernoulliho rovnice. [8] [9] [11]

- **Nejčastější vložené prvky norma ČSN ISO 5167-1**
  - clony
  - dýzy
  - Venturiho trubice
  - Venturiho dýza

#### **Bernoulliho rovnice**

Tlakové poměry v potrubí při proudění tekutiny popisuje Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon zachování energie mezi dvěma body. Rovnice (3.13) je tvar Bernoulliho rovnice pro energii nestlačitelného plynu o jednotkovém objemu. [8] [9]



Obr. 8 Označení veličin pro Bernoulliho rovnici

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} + \rho g h_1 = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_{z1-2} \quad (3.13)$$

První člen je *potenciální energie tlaková*, druhý člen představuje *kinetickou energii*. Třetí člen představuje *potenciální energie tíhovou*, která je vztažena ke zvolené nulové hladině. Pokud jsou vyšetřované body ve stejné výšce, můžeme tento člen vynechat. Člen na pravé straně  $p_{z1-2}$  reprezentuje tlakové ztráty mezi body 1 a 2, které se skládají z třecích ztrát a místních ztrát. [8] [9]

Celkový tlak se skládá ze statického a dynamického tlaku, jak je vidět v rovnici (3.14)

$$p_c = p_s + p_d \quad (3.14)$$

Dynamický tlak je roven

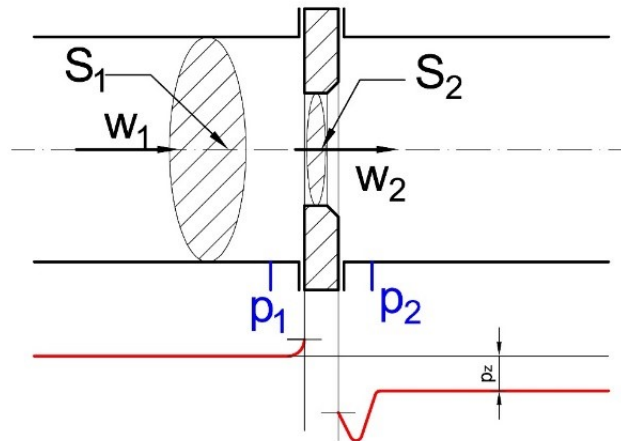
$$p_d = \frac{\rho w^2}{2} \quad (3.15)$$

A statický tlak

$$p_s = p_1 + \rho g h_1 \quad (3.16)$$

### Měření pomocí vložené clony, dýzy a Venturiho trubice

Do potrubí je vložen škrťací orgán o definovaných rozměrech. Při průtoku tekutiny prvkem roste dynamický tlak a klesá tlak statický, za prvkem je dynamický tlak stejný jako před vloženým prvkem. Tlakové ztráty se projeví poklesem statického tlaku za prvkem. Měření probíhá ve vodorovném potrubí  $h_1=h_2=0$  na základě čehož můžeme Bernoulliho rovnici upravit do tvaru (3.17). Výpočet bude popsán na cloně. Zbylé škrťací prvky jsou popsány na konci této kapitoly. [8] [9] [11]



Obr. 9 Clona a průběh statického tlaku

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} + p_{z1-2} \quad (3.17)$$

Rovnice kontinuity

$$\dot{Q}_{m1} = \dot{Q}_{m2} \quad (3.18)$$

Z Bernoulliho rovnice (3.17) a rovnice kontinuity (3.18) při zavedení poměrného zúžení (3.19) dostáváme rovnici pro objemový průtok při měření difference tlaků (3.20).

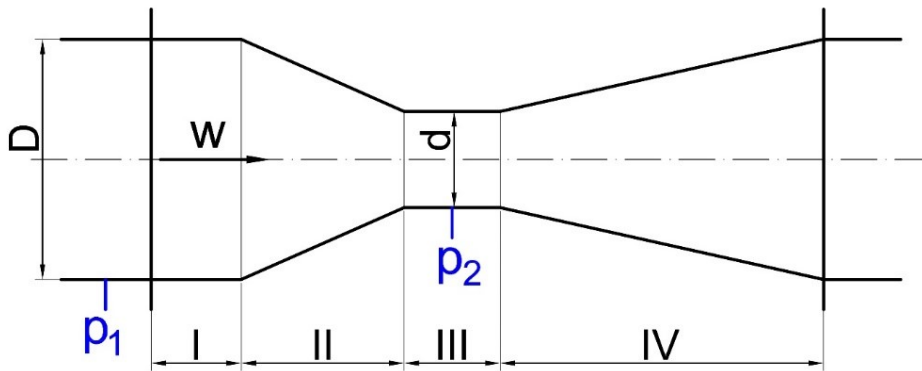
$$m = \frac{S_2}{S_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (3.19)$$

$$\dot{Q}_v = S_2 \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3.20)$$

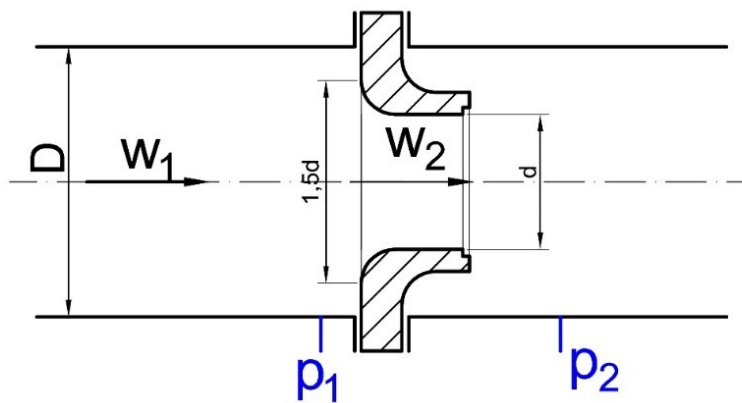
Za clonou díky zúžení proudu stále klesá statický tlak. Pro postihnutí tohoto jevu zavádíme koeficient zúžení  $\mu$ . Další koeficient  $\xi$  je nutno zavést z důvodu rozložení tlaku po průřezu potrubí a umístění odběru tlaku. Opravní součinitelé  $\mu$  a  $\xi$  jsou zahrnuti do průtokového součinitele  $\alpha$ . Hodnoty průtokového součinitele jsou na základě modelových pokusů znázorněny v grafech pro daný škrťací člen. Při proudění plynů dochází k expanzi a musíme uvažovat i expanzní součinitel  $\varepsilon$ . [8] [9] [11]

Pro objemový průtok plynu má rovnice tvar

$$\dot{Q}_v = \alpha \varepsilon S_2 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (3.21)$$



Obr. 10 Venturiho trubice



Obr. 11 Dýza

### 3.4 Měření průtoku pomocí měření objemu

Měřidla jsou založena na principu plnění a vyprazdňování předem definovaného prostoru a měření času, jak vyplývá z definice objemového průtoku. Tyto průtokoměry mohou pracovat spojitě nebo jednorázově. [8] [9]

## Přehled měřidel a jejich rozdělení

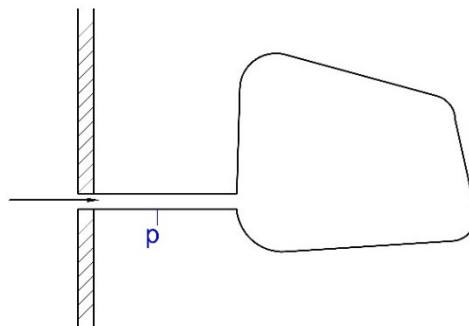
- Jednorázová měřidla
  - pro kapaliny
    - kádinky, odměrné válce
  - pro plyny
    - nádoby konstantního objemu
    - vaky o známém objemu s indikací tlaku
- Průběžná měřidla
  - pro kapaliny
    - kyvné měřidlo
    - bubnové měřidlo
  - pro plyny
    - bubnový plynoměr
    - membránový plynoměr

## Jednorázová měřidla

Pro měření čerpadel (průtoku kapaliny) se využívají nádoby o stanoveném objemu a měření času, který je potřebný pro naplnění této nádoby. U měření plynů se používají vaky s definovaným objemem a indikací tlaku (změna tlaku indikuje naplnění vaku). Poté podle rovnice (3.1) vypočítáme objemový průtok, případně z rovnice (3.7) hmotnostní průtok. [8]

$$\dot{Q}_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_v \rho \quad (3.7)$$



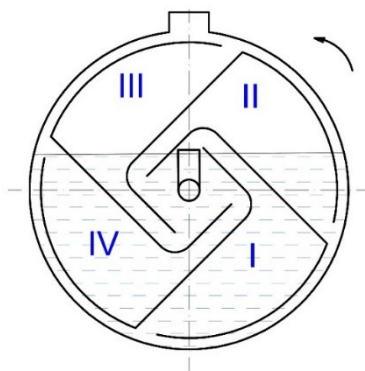
Obr. 12 Jednorázové měřidlo průtoku pro plyny

## Průběžná měřidla pro plyny

Měřidla mají více prostor o definovaném objemu, které se postupně naplňují a vyprazdňují. Měřidla jsou vybavena počítadlem cyklů nebo otáček, která umožňují měřit jak průtok, tak i proteklé množství.

### *Mokrý plynoměr*

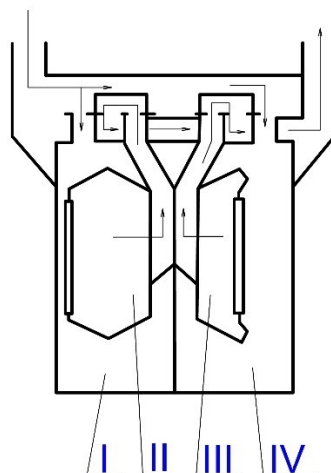
Používá se pro laboratorní měření. Průtokoměr se skládá z válcové nádoby a bubnu, který je rozdělen do čtyř stejných komor. Je naplněn kapalinou například destilovanou vodou nebo olejem. Plyn vstupuje středem a je vyveden nad hladinu kapaliny, začíná plnit první komoru a otáčet měřicím bubnem. Komora II je zcela naplněna plynem, plyn je uzavřen kapalinou. Kapalina v komoře III vytlačuje plyn. Poslední komora je zcela zaplněna tekutinou. Plyn odchází v horní části měřidla. [8] [9] [11]



Obr. 13 Mokrý plynoměr

### *Membránový plynoměr*

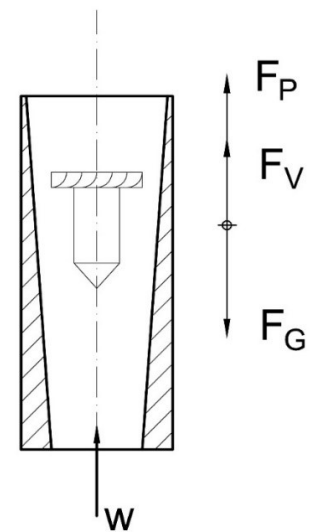
Opět je zde využito postupné plnění a vyprazdňování měřicích komor a počítání cyklů. Plynoměr se skládá ze dvou skříní. V každé skříní je membrána, která danou skříň rozděluje na dvě komory. Komory jsou propojeny mechanismem a proteklé množství se určuje z počtu cyklů. Tento typ plynoměru se používá pro měření spotřeby plynu u bytů. [9] [11]



Obr. 14 Membránový plynoměr

### 3.5 Měření průtoku pomocí odporových tělísek

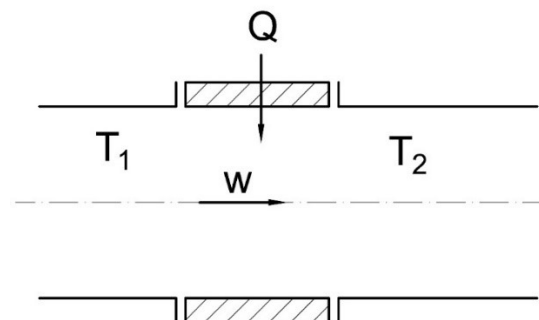
Měřidla využívající odporová tělíska se také nazývají rotametry. Měří objemový průtok a hmotnostní je dopočítán. Měřidlo se skládá ze svislého válce skleněného či železného, z vyměnitelné stupnice pro různé teploty tekutiny a odporového tělíska. Při měření působí na tělísko síla gravitační  $F_G$ , vzlaková  $F_V$  a síla unášivá  $F_P$ . Při konstantním průtoku se tělísko ustálí v určité výšce, kde jsou síly v rovnováze, a z této polohy určíme průtok. Polohu tělíska můžeme snímat opticky či magneticky. [8] [9] [11]



Obr. 15 Rotametr

### 3.6 Měření průtoku pomocí kalorimetrie

Měřidla využívající kalorimetrii jsou tzv. Thomasovy válce, měří hmotnostní průtok a objemový průtok lze dopočítat. V definované délce je přiváděn tepelný tok. Z kalorimetrické rovnice, která vyjadřuje tepelnou rovnováhu (3.22) a známých parametrů tekutiny je vyjádřena rovnice pro hmotnostní tok (3.23). Přivedený tepelný tok je vypočítán z příkonu a zahrnuje vlastnosti samotného měřidla a měřené tekutiny, což jsou například tepelná vodivost použitých materiálů, účinnost topného elementu a součinitel přestupu tepla. [8] [9] [11]



Obr. 16 Průtokoměr využívající kalorimetrii

$$\dot{Q} = \dot{m} c (T_2 - T_1) \quad (3.22)$$

po úpravě rovnice dostaneme pro hmotnostní tok vztah

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c (T_2 - T_1)} \quad (3.23)$$

Kde:

$\dot{m}$  ... hmotnostní tok [kg]

$\dot{Q}$  ... přivedený tepelný tok [W]

$c$  ... měrná tepelná kapacita (u plynů  $c_p$ ) [J/kgK]

$T_1$  ... teplota před průtokoměrem [K]

$T_2$  ... teplota za průtokoměrem [K]

### 3.7 Měření průtoku pomocí měření rychlosti

Na začátku kapitoly o měření průtoku byl vysvětlen výpočet průtoku na základě známé rychlosti a plochy potrubí viz rovnice (3.3). Tyto metody měření průtoku využívají právě výše zmíněný vztah. Především *měření střední rychlosti pomocí lokálních rychlostí* je často využíváno při měření průtoku pro regulaci vzduchovodů. [8]

- Měření střední rychlosti rychlostními průtokoměry
  - s axiálním tokem
  - s tangenciálním tokem
- Měření střední rychlosti pomocí lokálních rychlostí
  - metoda proměření rychlostního pole
  - měření v několika bodech, které zastupují stejnou plochu

### Měření střední rychlosti rychlostními průtokoměry

Hlavní částí těchto měřidel je oběžné kolo, na které působí proud tekutiny. Každé měřidlo má svou rovnici pro objemový průtok (3.24). Podle umístění oběžného kola ke směru proudu se měřidla dělí na měřidla s axiálním tokem a měřidla s tangenciálním tokem. Frekvence otáček je snímána pomocí mechanických snímačů, nebo bezdotykových snímačů (např. indukčních, elektromagnetických snímačů). Rychlostní průtokoměry jsou často používány jako vodoměry v domácnostech. [8]

$$\dot{Q}_v = k_0 + k_1 n \quad (3.24)$$

Kde:

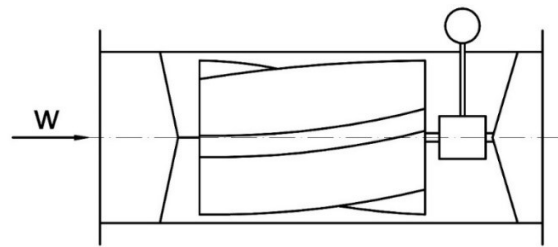
$\dot{Q}_v$  ... objemový průtok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$n$  ... otáčky

$k_0, k_1$  ... konstanty měřidla, které se určují cejchováním

### **Měřidla s axiálním tokem**

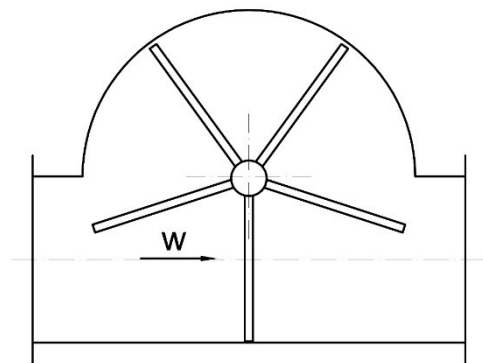
Tekutina protéká oběžným kolem v axiálním směru. Oběžná kola mají tvar vrtulky, turbíny nebo šroubové plochy (Woltmannovo měřidlo). [8] [9] [11]



Obr. 17 Průtokoměr s axiálním tokem

### **Měřidla s tangenciálním tokem**

Oběžné kolo má tvar radiálního kola, tekutina prochází kolem v tangenciálním směru. [8] [9] [11]



Obr. 18 Průtokoměr s tangenciálním tokem

## **Měření střední rychlosti pomocí lokálních rychlostí**

Měřením lokálních rychlostí lze stanovit střední rychlost proudění. K stanovení střední rychlosti se využívá několika metod.

### **Metoda proměření a proložení rychlostního pole či profilu**

Tato metoda je velmi přesná a zároveň náročná. Metoda nám poskytne střední hodnotu rychlosti a umožní nám v grafické podobě znázornit průběh rychlostí v měřeném řezu. Střední rychlost získáme pomocí věty o střední integrální hodnotě. [8] [10]

$$\bar{w} = \frac{1}{b-a} \int_a^b f_x dx \quad (3.25)$$

Výpočet lze pro kruhový kanál o poloměru  $R$  (velmi častá varianta měření) upravit do tvaru (3.26). Nejjednodušší nástroj, který lze považovat za integrování je aritmetický průměr. Pokud hodnoty nezastupují stejně velké plochy, je nutné použít vážené průměrování, které je relativně náročné. Lepší varianta je zvolit měřící body tak, aby zastupovaly stejnou plochu a bylo možné použít aritmetický průměr. V kruhovém

potrubí lze stanovit body pro měření podle vztahu (3.27). V daném vztahu  $n$  zastupuje celkový počet bodů na poloměru a  $i$  je daný bod, pro který počítáme poloměr. [8] [10]

$$\bar{w} = \frac{2}{R_2^2 - R_1^2} \int_{R_1}^{R_2} f(r)rdr \quad (3.26)$$

$$r_i = R \sqrt{\frac{2i - 1}{2n}} \quad (3.27)$$

### ***Metoda měření lokálních hodnot rychlosti ve vytypovaných či ověřených místech***

Měříme lokální hodnoty rychlosti v bodech, u kterých máme ověřeno, že lokální rychlost je rovna střední rychlosti proudění. Metoda je méně pracná, ale zároveň méně přesná. Například pro potrubí kruhového průřezu s vyvinutým turbulentním prouděním je tento bod na poloměru  $r = 0,76R$  [8]

### ***Metoda měření rychlosti v ose potrubí***

Tato metoda je založena na znalosti proudění v daném průřezu a určení rychlostního součinitele  $k$ . Součinitel můžeme určit teoreticky nebo experimentálně. Střední rychlost vypočteme podle rovnice (3.28). Samotná metoda měření není pracná. Pracné je určení rychlostního součinitele. Metodu lze s výhodou využít, pokud průtok budeme v daném místě měřit častěji. [8]

$$\bar{w} = kw_0 \quad (3.28)$$

### ***Metoda měření s víceotvorovými rychlostními sondami***

Měříme celkový tlak a tlak statický. Odběrná místa celkového tlaku jsou propojena a měříme střední celkový tlak. Rozdíl těchto tlaků nám dá tlak dynamický, ze kterého vypočítáme rychlost podle rovnice (3.29). Metoda je velmi přesná. Zásadní nevýhodou je, že vyžaduje speciální sondy, které jsou často jednoúčelové. Odběrná místa celkového tlaku musí zastupovat stejnou plochu měřeného průřezu, aby měřený dynamický tlak byl střední dynamický tlak. [8]

$$\bar{w} = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (3.29)$$

## 4 Měření rychlosti

Pro naše měření bude nejvhodnější metoda měření průtoku pomocí střední rychlosti, kterou určíme z lokálních rychlostí, jak bylo popsáno v kapitole: 3.7 *Měření průtoku pomocí měření rychlosti*. V následující kapitole se zaměříme na způsoby měření rychlosti.

### 4.1 Mechanické anemometry

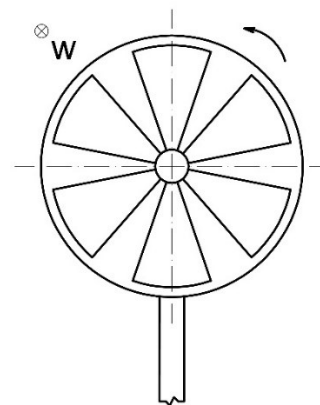
Mechanické anemometry využívají silové působení na oběžné kolo. Anemometry můžeme rozdělit podle tvaru oběžného kola na *Lopátkové anemometry*, *Vrtulkové anemometry* a *Miskové anemometry*. Rychlost proudění je určena z počtu otáček oběžného kola podle vztahu (4.1) [8] [9]

$$w = a + bn \quad (4.1)$$

Konstanty  $a$   $b$  jsou nahrány v paměti zařízení. Tyto konstanty jsou vztaženy k hustotě plynu a při měření v různých podmínkách se mění. Hodnoty lze určit také pomocí cejchování. Anemometry se do proudu vzduchu vkládají buď podle označení, nebo aby se oběžné kolo otáčelo ve směru hodinových ručiček. [8] [9]

#### *Lopátkové anemometry*

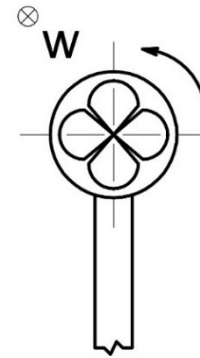
Lopátkové anemometry jsou určeny pro měření rychlosti v rozsahu 0,1 – 20 m/s. Oběžné kolo se skládá z šikmo umístěných destiček, nebo tvarovaných lopatek. Obvykle má průměr 80 až 200 mm. Při měření v nerovnoměrném rychlostním poli je naměřená rychlost větší než skutečná. [8] [9]



Obr. 19 Lopátkový anemometr

### ***Vrtulkové anemometry***

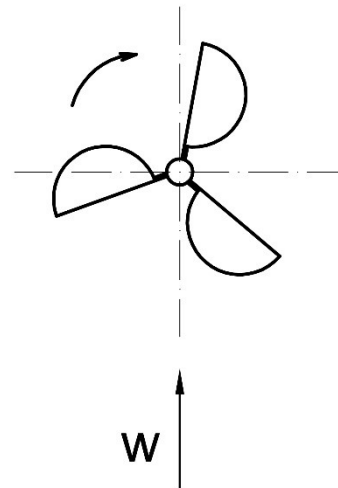
Vrtulkové anemometry mají menší průměry (10 – 20 mm) na rozdíl od lopatkových anemometrů jsou vhodné i pro proměření rychlostních profilů v kanálech. Použití těchto anemometrů je pro proudění v rozsahu 0,4 – 40 m/s. [8] [9]



*Obr. 20 Vrtulkový anemometr*

### ***Miskové anemometry***

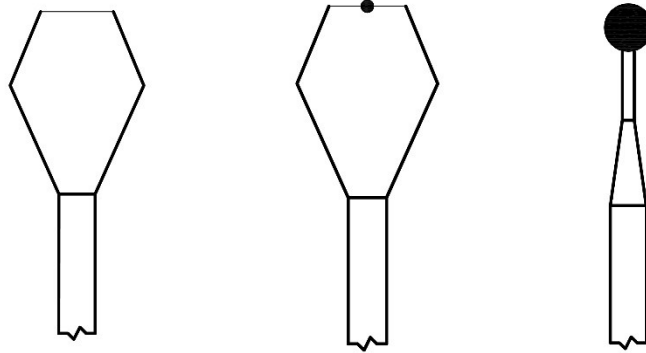
Miskové anemometry jsou často využívány pro měření v meteorologických stanicích. Aby anemometr podával informaci i o směru a nejen o rychlosti proudění bývá vybaven kormidlem. Rozsah vhodných rychlostí pro měření tímto anemometrem je 1 - 40 m/s. [8] [9]



*Obr. 21 Miskový anemometr*

## **4.2 Termoanemometry**

Termoanemometry se také označují jako žárové anemometry, nebo jako žhavené anemometry. Princip měření rychlosti je založen na ochlazování žhaveného tělíska. Tepelný tok konvekcí z tělíska do okolí by měl být v rovnováze s příkonem, kterým je tělíska žhavené. Tělíska jsou například *žhavené drátky*, *žhavené tělíska z termistoru*, *žhavené folie* nebo *žhavené kuličky*. Podle konstrukce anemometru lze použít v rozsahu proudění 0 – 100 m/s. [8] [9]



Obr. 22 Termoanemometry

### **Žhavené drátky**

Vyrábějí se z platiny, wolframu nebo niklu. Průměr drátku je 0,01 – 0,1 mm. V extrémních případech, pokud potřebujeme měřit rychlost s co nejmenší časovou konstantou, která ovlivňuje rychlost měření, může být průměr drátku 2,5 – 15  $\mu\text{m}$ . Při použití takto tenkých drátků může dojít k porušení drátku nečistotami v proudu vzduchu. Drátkové anemometry se vkládají drátkem kolmo k proudu, při odklonu dochází k chybě. [8] [9]

### **Žhavené kuličky**

Žhavené kuličky jsou nejčastěji o průměru 2 – 6 mm. Kuličky mají větší časovou konstantu než tenké drátky. Proto musí být v proudu vzduchu v ustálené poloze delší dobu, než naměří skutečnou hodnotu. Žhavené kuličky jsou také více negativně ovlivněny zářením blízkých stěn. Jejich výhodou je větší odolnost vůči poškození. [8]

Tepelný tok konvekcí z tělíska je vyjádřen rovnicí (4.2) [8]

$$\dot{Q} = S \alpha (T_w - T_\infty) \quad (4.2)$$

Kde:

$S$  ... plocha tělíska [m<sup>2</sup>]

$\alpha$  ... součinitel přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>K]

$T_w$  ... teplota tělíska [K]

$T_\infty$  ... teplota tekutiny [K]

Ochlazování tělíska popisuje kriteriální rovnice (4.3) pro Nusseltovo číslo, ze kterého lze vyjádřit vztah pro součinitel přestupu tepla (4.4) Tento součinitel závisí na Nussletově čísle, charakteristickém rozměru  $L$  [m] a na tepelné vodivosti tekutiny  $\lambda$  [W/mK]. Hodnoty  $C$ ,  $m$ ,  $n$  v kriteriální rovnici závisí na režimu proudění tekutiny.

Reinoldsovo číslo (4.5) je funkcí rychlosti proudění tekutiny  $w$  [m/s], charakteristického rozměru  $L$  [m] a kinetické viskozity tekutiny  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]. [8] [9]

$$N_u = C R_e^m P_r^n \quad (4.3)$$

$$\alpha = \frac{N_u L}{\lambda} \quad (4.4)$$

$$R_e = \frac{w L}{\nu} \quad (4.5)$$

Příkon elektrického ohřevu vypočítáme z elektrického odporu  $R$  [ $\Omega$ ] a proudu  $I$  [A]. [8] [9]

$$P = R I^2 \quad (4.6)$$

V ustáleném stavu jsou rovnice (4.2), (4.6) v rovnováze. Při pohledu na rovnici (4.6) se nám nabízejí dvě možnosti měření. Můžeme měřit elektrický odpor  $R$  při konstantním proudu  $I$ , nebo měřit proud při konstantním odporu  $R$ . Odpor je funkcí teploty tělíska, která je při konstantním odporu také konstantní. [8] [9]

#### ***Metoda konstantního žhavicího proudu***

Žhavené tělísko je ohříváno konstantním proudem. Vlivem proudící tekutiny je tělísko ochlazováno. Mění se teplota a tím i odpor tělíska. Změnu odporu lze určit měřením napětí na odporu  $R = f(w)$ , nebo měřením teploty tělíska  $T_w = f(w)$ . Závislosti jsou určovány cejchováním. [8] [9]

#### ***Metoda konstantního odporu neboli konstantní teploty povrchu***

Odpor tělíska je udržován na konstantní hodnotě žhavicím proudem. Proud je úměrný rychlosti proudění tekutiny. Tato závislost se určuje cejchováním. [8] [9]

Postupem času se může kvalita celého obvodu měnit, z tohoto důvodu jsou nutné kontroly měřidel. S případnou změnou závislostí skutečné hodnoty rychlosti a naměřené hodnoty je nutno provést kalibraci. Můžeme použít přepočítání hodnot pomocí regresní křivky, kterou získáme kalibrací. Tento přepočítání může proběhnout přímo v měřidle nebo při vyhodnocení. [8] [9]

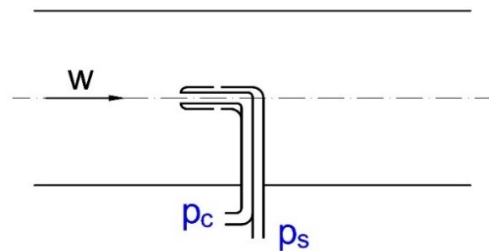
### 4.3 Dynamické rychlostní sondy

Dynamické sondy najdou využití při měření rychlosti v potrubí, v uzavřených místnostech i při měření rychlostí v otevřených prostorech. Sondy lze využít jak pro měření plynů, tak i pro měření kapalin. Sondy mají dvě odběrná místa tlaků. První je v náběžném bodě sondy a odebírá tlak celkový  $p_c$ . Druhý je odběr statického tlaku  $p_s$ . Při připojení odběrů k diferenčnímu manometru, který vyhodnocuje tlak dynamický  $p_d$ , lze vypočítat rychlost proudění. Po upravení rovnice (3.15) můžeme vypočítat rychlost proudění podle vztahu (4.7). Kvalitní sondy mají konstantu  $k$  rovnu 1, u méně kvalitních sond je tato konstanta určena cejchováním. Mezi základní dynamické sondy patří Pitotova trubice a Prandtlůva trubice. [8] [9] [10]

$$w = k \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (4.7)$$

#### ***Pitotova trubice***

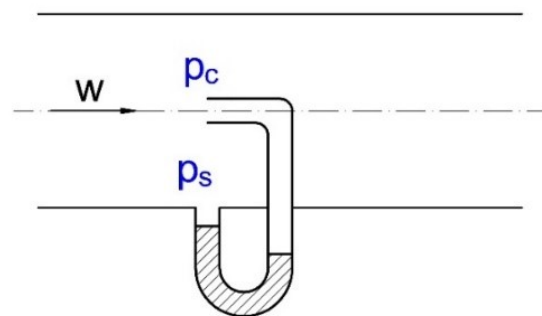
Jedná se o velmi jednoduchou sondu. Vyrobená je z trubičky, která je zahnutá. Pitotova trubice se vkládá proti proudění tekutiny a snímá celkový tlak. Odběr statického tlaku je na stěně potrubí. Jak hodnota difference tlaku, tak i rychlost proudění je závislá na natočení sondy. Tuto vlastnost lze využít pro stanovení směru proudění, kdy natočením sondy hledáme maximální rychlost. [8] [9] [10]



Obr. 23 Dynamické sondy

#### ***Prandtlůva trubice***

Oproti Pitotově trubici je Prandtlůva trubice složitější na výrobu, ale její výhodou je v přesnosti měření. Celkový tlak  $p_c$  je odebírán na náběžné straně sondy a statický tlak  $p_s$  je odebírán otvory v plášti. Prandtlůva sonda je směrově závislá a přesnost měření je závislá na směru vložení sondy proti proudu. Tuto vlastnost lze využít k určení směru proudění stejně tak jako Pitotovy trubice. [8] [9] [9]



Obr. 24 Dynamické sondy



## 5 Nejistota měření

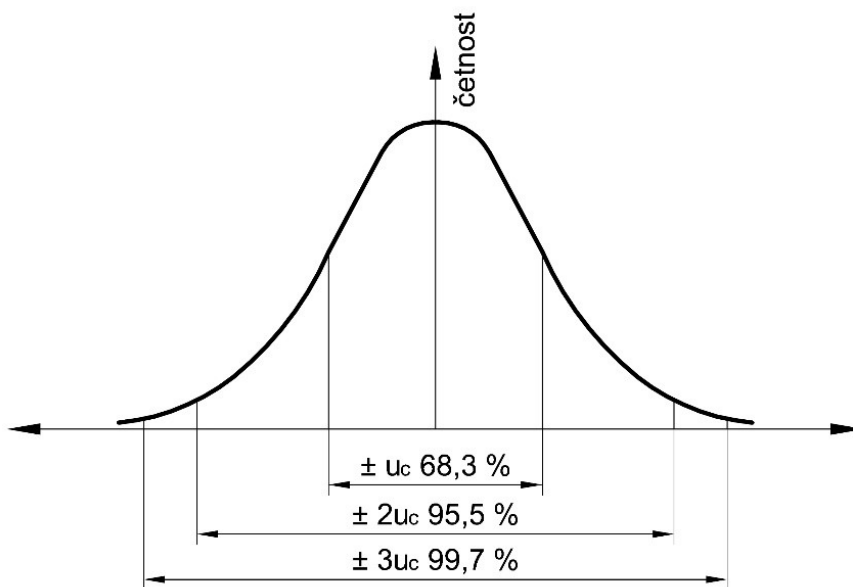
Každá naměřená hodnota je zatížena nepřesností, která je způsobena nepříznivými vlivy, které se mohou vyskytovat v měřicím procesu. Nepřesnost měření se projevuje odchylkou mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Nejistota měření je interval o velikosti  $\pm u_{cy}$  se středem v naměřené hodnotě. V intervalu se skutečná hodnota vyskytuje s danou pravděpodobností. [8]

Hodnota celkové nejistoty měření se skládá ze dvou dílčích nejistot a to z *nejistoty typu A* a *nejistoty typu B*, které můžeme vyčíslit. Celkovou nejistotu měření vypočítáme podle vzorce (5.3). [8]

$$u_{cy} = \sqrt{(u_{Ay}^2 + u_{By}^2)} \quad (5.1)$$

Celková nejistota reprezentuje interval, ve kterém se při předpokladu Gaussova normálního rozložení, vyskytuje skutečná hodnota s 68,3 % pravděpodobností. Pokud potřebujeme vyšší pravděpodobnost výskytu skutečné hodnoty, zavádíme rozšířenou nejistotu  $U$ . Rozšířenou nejistotu vypočítáme podle rovnice (5.2). V případě, že je koeficient rozšíření  $k_r$  roven 2, skutečná hodnota se v daném intervalu vyskytuje s 95,5 % pravděpodobností. Pro 99,7 % pravděpodobnost je koeficient roven 3. [8]

$$U = k_r u_{cy} \quad (5.2)$$



Obr. 25 Znárodnění základní a rozšířené nejistoty

## 5.1 Nejistota typu A

Tato nejistota zahrnuje statistickou odchylku naměřených hodnot. Závisí na počtu opakování měření. Je-li počet opakování měření  $n \geq 10$  nejistota typu A pro průměrnou hodnotu z měření je vyčíslena pomocí vzorce (5.3), kde koeficient bezpečnosti  $k_a$  je roven 1. V případě, že počet měření  $n \leq 10$ , je nutné rozšířit nejistotu koeficientem bezpečnosti  $k_a$ . Hodnota koeficientu je v tabulce 1. [8]

$$u_{Ay} = k_a \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.3)$$

Kde:

$k_a$  ... koeficient bezpečnosti

$n$  ... počet měření

$y_i$  ... hodnota i-tého měření

$\bar{y}$  ... aritmetický průměr ze všech měření

Tabulka 1 Koeficient  $k_a$

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k_a$	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

## 5.2 Nejistota typu B

Tato nejistota zahrnuje ostatní vlivy zasahující do měření, například způsob měření, odečítání z analogových měřidel, druh měřidla. Tyto vlivy se velmi složitě vyčísľují, proto často nejistotu typu B redukuje pouze na nejistotu měřidla. Rovnici pro vyhodnocení nejistoty měřidla uvádí výrobce. [8]

## 5.3 Nejistota nepřímo měřené veličiny

Dosud jsme se zabývali vyhodnocováním nejistoty měření pro přímo měřenou veličinu, jako je například rychlost, teplota, délka atd. Nejistotu lze vyhodnotit i pro nepřímo měřené veličiny, jako je například průtok. Lze ji vyhodnotit z dílčích nejistot jednotlivých veličin, které měříme. Pokud je nepřímo měřená veličina  $y = f(A, B, C \dots)$ , tak nejistotu vyhodnotíme podle rovnice (5.4). [8]

$$u_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A} u_A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B} u_B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C} u_C\right)^2 + \dots} \quad (5.4)$$

## 6 Charakteristiky ventilátoru

Mezi veličiny, které charakterizují ventilátor, patří objemový průtok, celkový dopravní tlak, příkon a účinnost ventilátoru. [12]

Charakteristiky ventilátoru jsou závislosti dopravního tlaku, příkonu nebo účinnosti na objemovém průtoku ventilátorem. Charakteristiky ventilátoru jsou měřeny pro jedny vlastnosti plynu a bývají vykreslovány pro jednotlivé otáčky. Pokud je ventilátor používán při jiných otáčkách nebo hustotě plynu musí být charakteristiky přepočítány podle rovnic (6.1) až (6.6). [12]

Tabulka 2 Vzorce pro přepočet charakteristik ventilátoru

Parametr	Změna otáček při $\rho = \text{konstanta}$		Změna hustoty při $n = \text{konstanta}$	
	Objemový průtok	$\dot{Q}_{v2} = \dot{Q}_{v1} \frac{n_2}{n_1}$	(6.1)	$\dot{Q}_{v2} = \dot{Q}_{v1}$
Celkový dopravní tlak	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2$	(6.3)	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$	(6.4)
Výkon ventilátoru	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3$	(6.5)	$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$	(6.6)

Výkonová charakteristika ventilátoru lze vypočítat z tlakové charakteristiky podle následujícího vztahu.

$$P = \Delta p \dot{Q}_v \quad (6.7)$$

Kde:

$\Delta p$  ... dopravní tlak [Pa]

$\dot{Q}_v$  ... počet měření [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

### 6.1 Princip měření charakteristiky ventilátoru

Metodika měření charakteristik ventilátorů je popsána v ČSN 12 3061 *Vzduchotechnika. Ventilátory. Předpisy pro měření*, nebo také v mezinárodní normě ČSN EN ISO 5801 *Průmyslové ventilátory - Zkoušení výkonu s použitím normalizovaného vzduchovodu*. Při měření ventilátoru je povoleno umístit měřicí trať na sání ventilátoru, na výtlak ventilátoru nebo kombinovaně na sání i výtlak. Výsledky jsou stejné, protože měříme rozdíl tlaku před a za ventilátorem. Měřicí trať obsahuje

tlakové odběry pro stanovení celkového dopravního tlaku, měření průtoku a škrťací element pro změnu průtoku. [13] [14]

Vzhledem k tomu, že měříme ventilátor umístěný v automobilu a nemůžeme jej umístit na měřicí trať, která by splňovala veškeré požadavky norem, budeme muset při měření charakteristik ustoupit z požadavků a zvolit experimentální postup.

## Měření celkového dopravního tlaku

Automobil byl vybaven tlakovými odběry před a za ventilátorem. Tlakovou diferencí těchto odběrů získáme celkový dopravní tlak do charakteristiky.

Bude proměřena provozní část charakteristiky. Změna tlakové difference bude vyvolána přenastavením klapek ve výtlaku ventilátoru.

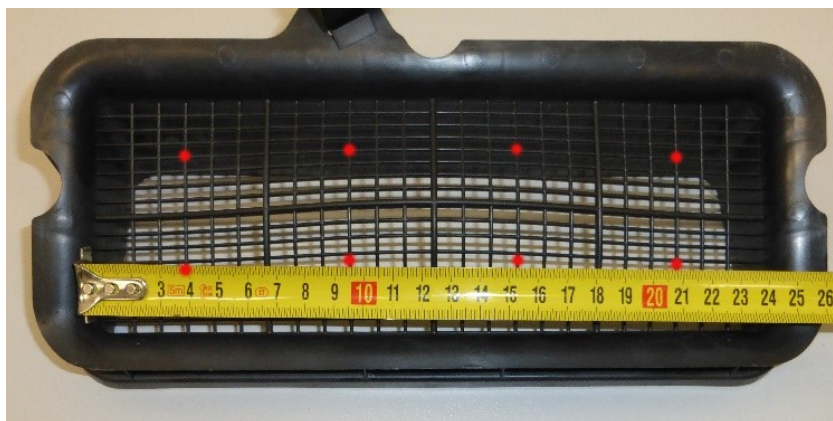
Pro stanovení tlakové difference, kterou lze nastavit pomocí sítě ventilátoru, bylo provedeno měření pouze difference tlaků při různém nastavení klapek a uzavírání ofukovačů. Před samotným měřením bylo navrženo 9 různých variant škrčení (I-IX). Následně po měření byly vybrány 4 varianty škrčení, které budou použity při měření charakteristiky. Zvolené varianty jsou následující I – všechny ofukovače otevřeny bez priority, II – všechny ofukovače uzavřeny bez priority, V – uzavřené ofukovače v předu bez priority, IX- vše uzavřeno + priorita pouze nohy, priorita pouze tělo, priorita defrost.



Obr. 26 Tlakové odběry

## Návrh měření průtoku ventilátoru

**První návrh** měření průtoku pro charakteristiku je měření lokálních rychlostí na sací mřížce ventilátoru, ze kterých bude vypočítána střední rychlost. Sací mřížka bude rozdělena do 8 obdélníků se stejnou plochou. Díky tomu střední rychlost lze vypočítat jako průměrnou rychlost. Průtok bude vypočítán podle rovnice (3.3).

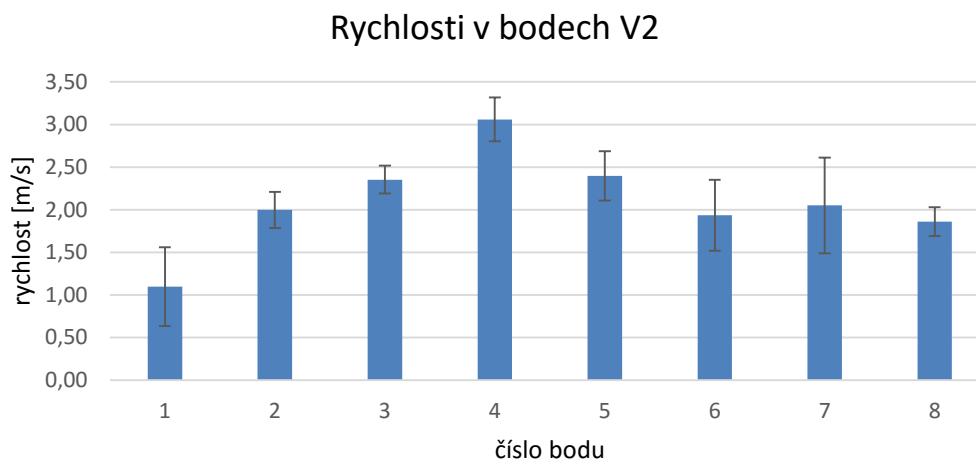


Obr. 27 Označení bodů na sací mřížce

Před samotným měřením tlakové charakteristiky bylo provedeno testovací měření průtoku na sací mřížce, jehož účelem bylo prověření vhodnosti navrhované metody. Během měření byly zjištěny nežádoucí vlivy, které by značně ovlivňovaly výsledky.

**Nežádoucí vlivy při měření:**

- značná nerovnoměrnost rozložení rychlostí v bodech díky propadům při sání
- velká nejistota měření typu A
- značná nestabilita rychlostí v bodech
- nasávaný vzduch byl značně ohříván motorem
- špatná dostupnost k bodům



Obr. 28 Rychlosti v bodech na sací mřížce V2

**Druhý návrh** měření průtoku pro charakteristiku je měření v ustalovacím kanále, který byl k dispozici na OTTP (Obr. 29). Proud vzduchu v ustalovacím kanále má více prostoru pro ustálení a zrovnoměrnění rychlostního profilu. Vliv tepla od motoru byl minimalizován zakrytím motoru plechem. Pro výpočet střední rychlosti byla použita *Metoda proměření a proložení rychlostního pole či profilu*, která je popsána v kapitole *Měření průtoku pomocí měření rychlosti*. Pro připojení kanálu k sání

automobilu bylo nutné odmontovat sací mřížku a nahradit jí mezikusem, který je na Obr. 30.



*Obr. 29 Ustalovací kanál instalován na automobilu*

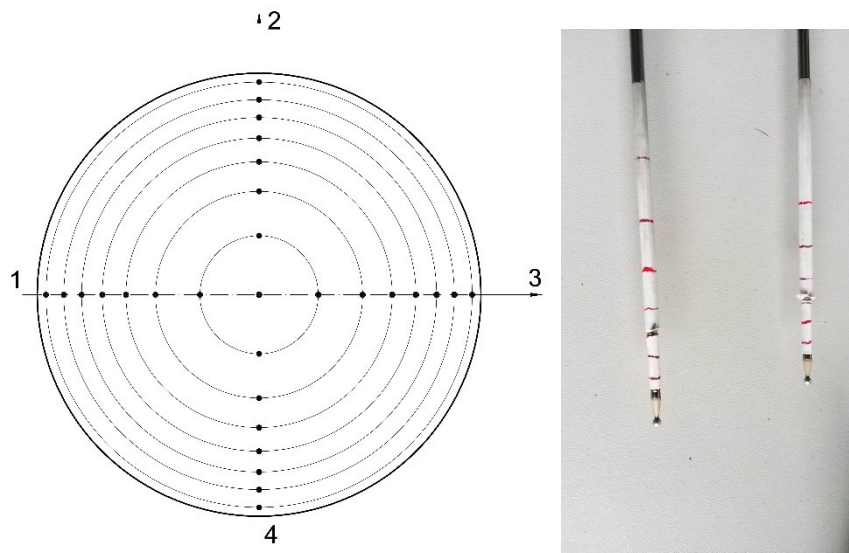


*Obr. 30 Redukce pro připojení ustalovacího kanálu*

Pro měření rychlostního profilu bylo zvoleno 7 bodů na poloměru a střed kanálu. Polohy bodů byly vypočítány podle vzorce (3.27). V tabulce jsou uvedeny poloměry bodů  $r_i$  a vzdálenosti bodů od stěny kanálu  $x_i$ . Při každém měření bude průměrována rychlost  $v$  v bodě po dobu 5 sekund a bude brána jako hodnota pro dané opakování. Rychlostní profil bude proměřen pětkrát a následně bude vypočítán průtok.

*Tabulka 3 Rozložení bodů*

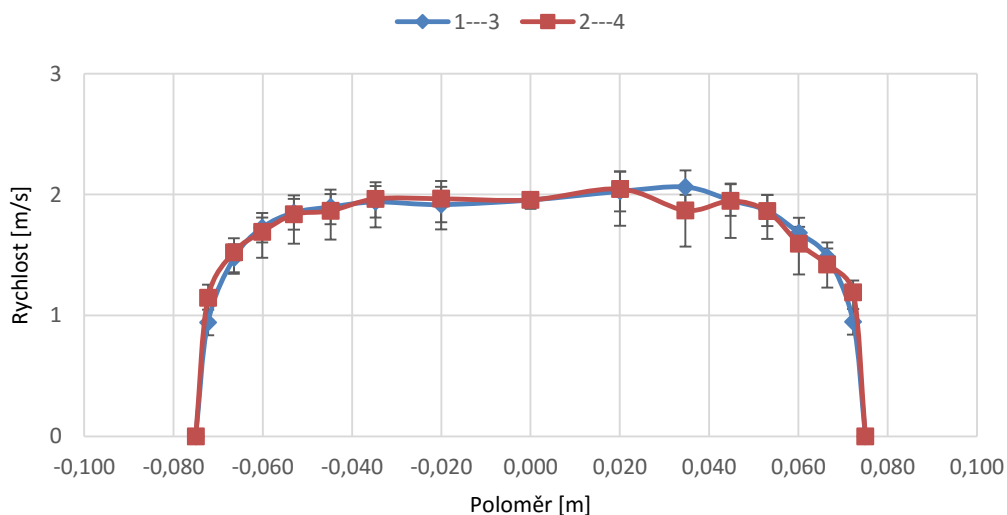
n	0	1	2	3	4	5	6	7
$r_i$ [mm]	0	20	35	45	53	60	66	72
$x_i$ [mm]	75	55	40	30	22	15	9	3



Obr. 31 Náčrt měření a označení poloh bodů na sondách napravo sonda 1 nalevo sonda 2

Rychlostní profil byl měřen směrem od stěny kanálu ke středu (body 7 - Střed). K měření jsme použili dvě sondy (*Anemometr se žhavenou kuličkou*), kterými jsme mohli vždy měřit dvě na sebe kolmé poloosy. Sondy byly připojeny k multifunkční stanici, která byla připojena k počítači. Program v počítači ukládal hodnoty po jedné vteřině. Na sondách bylo nutné označit vzdálenosti bodů od stěny kanálu. K tomu posloužila lepicí papírová páska, která šla snadno po měření sundat.

## PRŮBĚH RYCHLOSTI



Obr. 32 Rychlostní profil

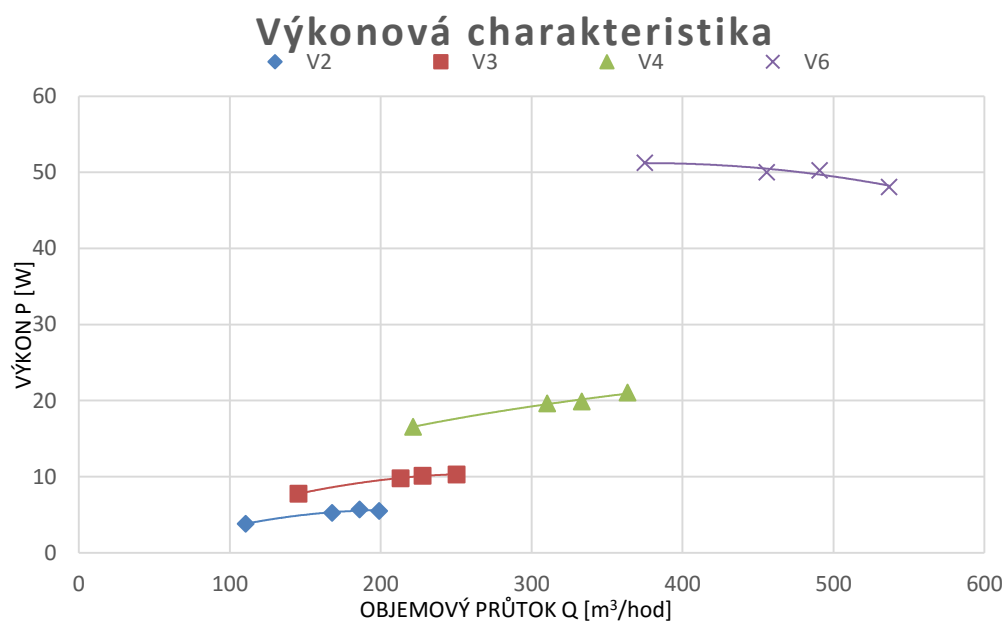
Rychlostní profil v obou na sebe kolmých osách je pro naše měření dostatečně ustálený. Zvýšení rychlostí v krajních bodech (u stěny kanálu) je dáno vlivem nasávání vzduchu skrz měřicí otvory.

### Shrnutí postupu při měření charakteristik ventilátoru

- byla proměřena tlaková charakteristika
- charakteristika byla proměřena pro 4 stupně otáček ventilátoru (V2, V3, V4, V6)
- každý otáčkový stupeň byl proměřen ve 4 bodech škrcení
- v každém bodě škrcení bylo provedeno pět měření rychlosti
- pro každý bod škrcení byla vyhodnocena nejistota měření
- byla vypočítána charakteristika výkonu
- byl vytvořen soubor v programu Microsoft Excel, ve kterém lze přepočítat charakteristiky pro jinou hustotu vzduchu, než která byla při měření

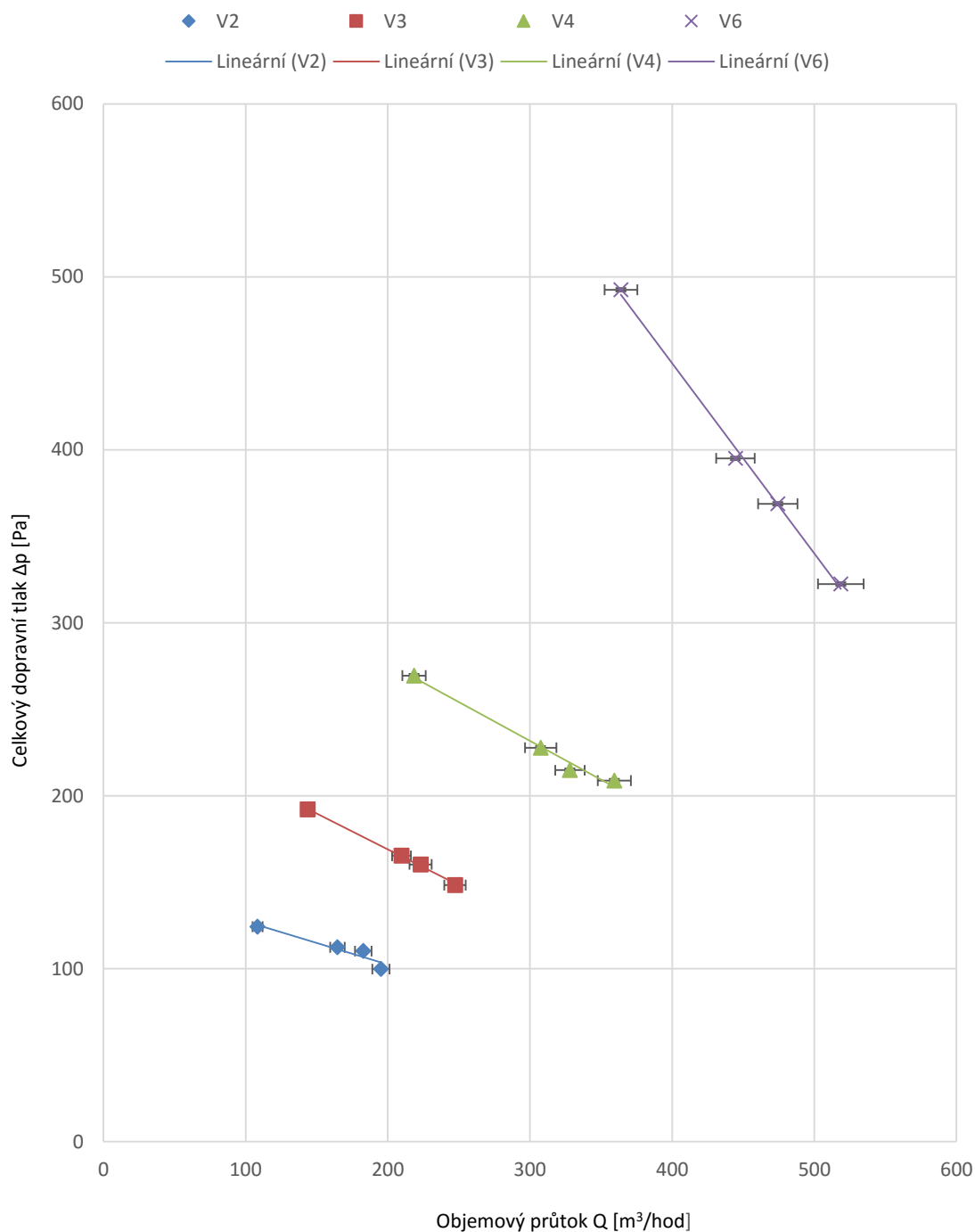
Tabulka 4 Přehled výsledků charakteristik ventilátorů

V2				V3			
bod	$\Delta p$ [Pa]	Q [m <sup>3</sup> /hod]	P [W]	bod	$\Delta p$ [Pa]	Q [m <sup>3</sup> /hod]	P [W]
II	124,3	108,4	3,7	II	192,1	143,7	7,7
IX	112,4	164,5	5,1	IX	165,3	209,7	9,6
V	110,2	182,7	5,6	V	160,3	223,1	9,9
I	99,8	195,2	5,4	I	148,4	247,3	10,2
V4				V6			
bod	$\Delta p$ [Pa]	Q [m <sup>3</sup> /hod]	P [W]	bod	$\Delta p$ [Pa]	Q [m <sup>3</sup> /hod]	P [W]
II	269,5	218,5	16,4	II	492,6	364,0	49,8
IX	227,8	307,5	19,5	IX	395,1	444,6	48,8
V	214,8	328,0	19,6	V	368,8	474,3	48,6
I	208,8	359,3	20,8	I	322,5	518,6	46,5



Obr. 33 Výkonová charakteristika ventilátoru

## TLAKOVÁ CHARAKTERISTIKA VENTILÁTORU



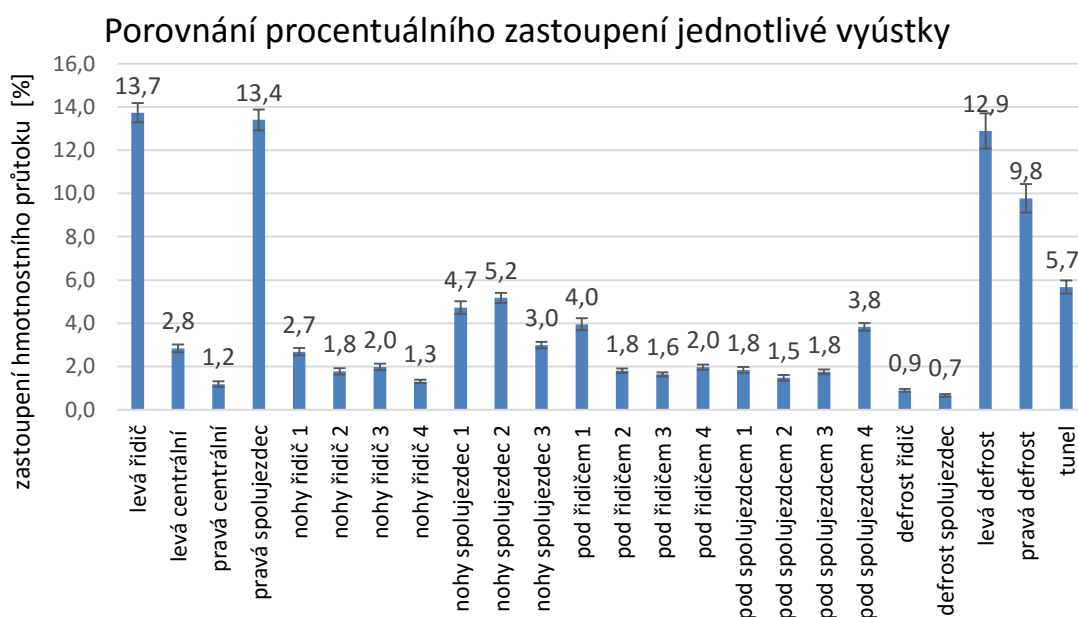
Obr. 34 Tlaková charakteristika ventilátoru

Tlaková charakteristika se používá pro určení průtoku na základě známé tlakové diference ventilátoru. Tlaková diference lze snadno měřit za použití diferenčního tlakoměru a dvou odběrů tlaku.



## 7 Měření distribuce vzduchu při různém nastavení HVAC

V této kapitole se zaměříme na druhý cíl této diplomové práce, a to změřit množství a rozložení distribuce přiváděného vzduchu v kabině automobilu. Nejdříve jsme na základě měření i teorie ověřili, že vliv nastavení otáček ventilátoru na distribuci vyústkami do kabiny je zanedbatelný. Tím se počet variant měření značně zjednodušil. Navíc pro matematický model, pro který je toto měření prováděno, není nutné přímo znát hmotností průtok, ale postačuje uvést procentuální zastoupení toku z jednotlivých vyústek. Výsledné distribuce bude možné následně v modelu aplikovat na různé hmotnostní toky přiváděného vzduchu. Příklad procentuálního zastoupení z jednotlivých vyústek je na Obr. 35



Obr. 35 Procentuální zastoupení toků jednotlivými vyústkami

Jak již bylo uvedeno v úvodu, automobil ŠKODA 3 umí větrat, topit a chladit.

Na ovládacím panelu (Obr. 36) lze nastavit otáčky ventilátoru, teplotu přiváděného vzduchu a místo preference přívodu vzduchu do kabiny. Nesmíme opomenout možný vliv okolních klimatických podmínek. Proměřit veškeré kombinace nastavení a klimatických podmínek by bylo takřka nemožné, proto byly vybrány jen některé kombinace, tak aby bylo možné zmapovat závislosti mezi nastavením, venkovní teplotou a rozložením distribuce vzduchu.

Toto měření jsme si rozložili na dvě části:

- Závislost rozložení toků vyústkami na nastavení otáček ventilátoru
- Závislost rozložení na nastavení preference přívodu vzduchu a okolních klimatických podmínkách



Obr. 36 Ovládací panel ŠKODA Octavia 3

### 7.1 Vliv nastavení otáček ventilátoru na distribuci vzduchu

Rozložení distribuce vzduchu jednotlivými vyústkami závisí na tlakových ztrátách (místních a délkových) v jednotlivých větvích potrubního systému, které vypočítáme podle rovnice (7.1) rovnice lze pro hmotnostní průtok upravit do tvaru (7.2).

$$\Delta p_z = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{w^2}{2} \rho \quad (7.1)$$

$$\Delta p_z = \left( \lambda \frac{l}{d} + \sum \xi \right) \frac{\dot{Q}_m^2}{2S^2 \rho} \quad (7.2)$$

Kde:

$\lambda$  ... součinitel tření [-]

$l$  ... délka potrubí [m]

$d$  ... průměr potrubí [m]

$\xi$  ... součinitel vřazeného odporu [-]

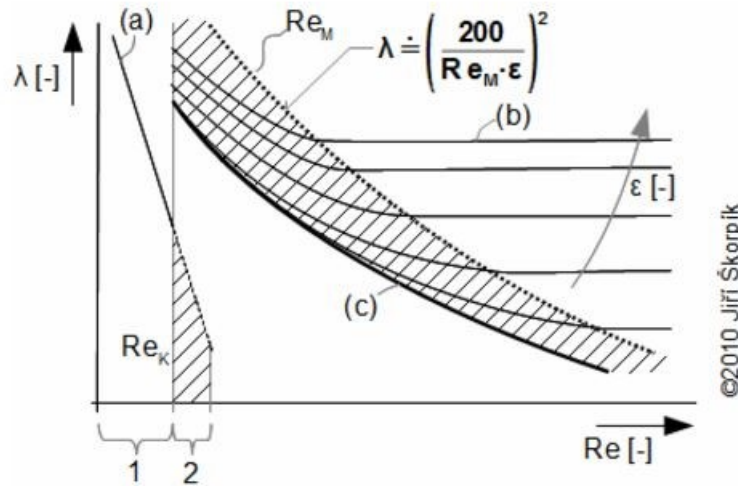
$w$  ... rychlost proudění [m/s]

$\rho$  ... hustota [kg/m<sup>3</sup>]

$S$  ... plocha potrubí [m<sup>2</sup>]

$\dot{Q}_m$  ... hmotnostní průtok [kg/s]

Budeme-li měnit pouze otáčky ventilátoru, tak součinitel vřazených odporů, hustota, délka a průměr potrubí budou konstantní. Součinitel tření se určuje například z Moodyho diagramu, který je na Obr. 37. Pokud budeme předpokládat v potrubí plně vyvinuté turbulentní proudění, tak i součinitel tření můžeme považovat za konstantní [15]. Za těchto předpokladů můžeme rovnici (7.2) upravit do následujícího tvaru. Kde  $K$  zastupuje veškeré parametry, které jsou při změně otáček konstantní.



Obr. 37 Moodyho diagram [15] Součinitel tření:

- (a) Pro laminárním proudění
- (b) Pro konkrétní hodnotu relativní drsnosti
- (c) Pro dokonale hladké potrubí

$$\Delta p_z = K \dot{Q}_m^2 \quad (7.3)$$

Pokud tekutina protéká místem větvení, průtok se rozdělí tak, aby si byly tlakové ztráty v odbočkách rovny.

$$\Delta p_{z1} = \Delta p_{z2} = \dots = \Delta p_{zn} \quad (7.4)$$

$$K_1 \dot{Q}_{m1}^2 = K_2 \dot{Q}_{m2}^2 = \dots = K_n \dot{Q}_{mn}^2 \quad (7.5)$$

Budeme uvažovat nejjednodušší dělení proudu, tedy dělení na dva proudy. Po úpravě rovnice (7.5) do tvaru (7.6) zjistíme, že se proudící tekutina rozdělí ve stejném poměru. Z toho vyplývá, že při plně turbulentním proudění nemají otáčky ventilátoru vliv na distribuci vzduchu vyústkami.

$$\dot{Q}_{m2} = \dot{Q}_{m1} k \quad (7.6)$$

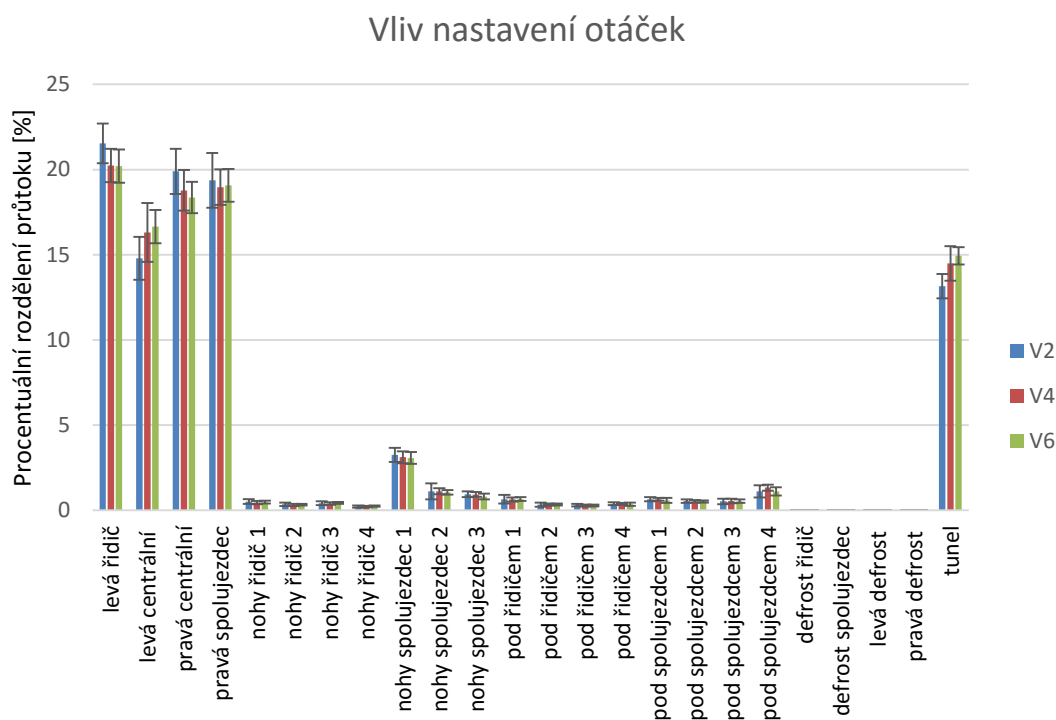
Pro ověření předpokladu stejného rozložení toků při změně otáček ventilátoru bylo provedeno měření, při kterém se měnily pouze otáčky. Vybrané nastavení a stupně ventilátoru jsou uvedeny v tabulce

Tabulka 5 Nastavení při měření vlivu ventilátoru

režim HVAC	roční období využití	teplota okolí [°C]	nastavená teplota v kabině automobilu	vybraný režim ventilátoru
větrání	jaro/podzim	17	Lo	V2
				V4
				V6

Na Obr. 38 je znázorněno porovnání rozložení toků při třech různých nastavení ventilátoru. Rozdíly u jednotlivých vyústek jsou v rozsahu nejistot a z výsledků nelze pozorovat žádný trend, který by popisoval změnu rozložení se změnou otáček ventilátoru.

Odvození výpočtu tlakových ztrát při průtoku místem větvení a měření třech různých rychlostních nastavení ventilátoru nám umožnilo vyloučit vliv nastavení ventilátoru na rozdělení průtoku v kabině automobilu.



Obr. 38 Vliv nastavení otáček na rozložení toků

## 7.2 Vybraná nastavení a klimatické podmínky pro měření

Abychom postihli tři režimy HVAC - topení, větrání a chlazení, zvolili jsme tři kombinace venkovní a vnitřní teploty. Pro tyto kombinace jsme použili tři volby preference místa přívodu vzduchu, a to bez preference přívodu vzduchu, preference přívodu vzduchu do oblasti nohou a preference přívodu vzduchu do oblasti těla. Preferenci přívodu vzduchu na čelní sklo (defrost) jsme měřili pouze v zimních klimatických podmínkách jako doplňující informaci pro matematický model. Kompletní přehled nastavení při měření je uvedeno v tabulce.

Měření bylo nastaveno tak abychom zjistili:

- Vliv režimu HVAC na distribuci vzduchu při stejném nastavení preference přívodu vzduchu
- Vliv nastavení preference přívodu vzduchu při stejném režimu HVAC

Tabulka 6 Nastavení při měření distribuce vzduchu

režim HVAC	využití	teplota okolí [°C]	teplota přiváděného vzduchu	Preferenze místa přívodu vzduchu				Intenzita slunečního záření [W/m <sup>2</sup> ]
topení	zima	-5 (5)	22	bez preference	nohy	tělo	defrost	0
chlazení	léto	26	18					800
větrání	jaro/ podzim	17	Lo					0

Pozn.: Během měření byla dlouhodobá závada na klimatické komoře a bylo nutné po prvním měření zimních klimatických podmínek změnit teplotu okolí z - 5 °C na 5 °C. Během letních podmínek i přes pouze manuální volby nastavení byla automaticky climatronicem aktivní recirkulace vzduchu.

## 7.3 Označení vyústek

V automobilu ŠKODA Octavia 3 je mnoho různých vyústek. Pro lepší orientaci byla vytvořena mapa s označením, která je na Obr. 39. Slovní popis zkratek je v tabulce.

Tabulka 7 Označení vyústek

Označení	Název	Označení	Název
LR	levá řidič	PR2	pod řidičem 2
LC	levá centrální	PR3	pod řidičem 3
PC	pravá centrální	PR4	pod řidičem 4
PS	pravá spolujezdec	PS1	pod spolujezdcem 1
NR1	nohy řidič 1	PS2	pod spolujezdcem 2
NR2	nohy řidič 2	PS3	pod spolujezdcem 3
NR3	nohy řidič 3	PS4	pod spolujezdcem 4
NR4	nohy řidič 4	DŘ	defrost řidič
NS1	nohy spolujezdec 1	DS	defrost spolujezdec
NS2	nohy spolujezdec 2	LD	levá defrost
NS3	nohy spolujezdec 3	PD	pravá defrost
PR1	pod řidičem 1	TU	tunel



Obr. 39 Označení vyústek v ŠKODA Octavia 3. generace

## 7.4 Měření hmotnostního průtoku vyústkami

Pro měření objemových průtoků vyústkami byla zvolena metoda *stanovení průtoku ze střední rychlosti proudění*, která je popsána rovnicí (3.3). Střední rychlosti proudění vyústkami byly stanoveny *měřením lokálních rychlostí* a jejich aritmetickým průměrováním. Každé nastavení bylo proměřeno pětkrát pro vyhodnocení nejistot typu A. Body pro měření lokálních rychlostí byly stanoveny tak, aby zastupovaly stejně velkou plochu. Body jsou vyznačeny na Obr. 40.



Obr. 40 Poloha bodů lokálních rychlostí

Hmotnostní průtok a následně poměrné zastoupení jednotlivými vyústkami byl vypočítán z objemového průtoku a hustoty. Pro určení hustoty je potřeba také měřit teplotu proudu.

**První návrh měření teploty:** proměřit teplotu v každém bodě při každém opakování.

Před samotným měřením v klimatické komoře bylo provedeno testovací měření, které mělo ověřit vhodnost postupu měření. Po testovacím měření byl postup měření teploty upraven. Hlavním důvodem pro úpravu měření teploty je jeho časová náročnost.

**Druhý návrh měření teploty:** proměřit teplotu pouze při prvním opakování.

## 7.5 Shrnutí postupu měření v kabině automobilu

- měření bylo provedeno pro různé kombinace nastavení, které jsou uvedeny v Tabulka 6
- měření začalo po 10 minutách od nastavení podmínek (čas pro ustálení)
- hmotnostní průtok byl určen ze střední rychlosti, hustoty a plochy pro každou vyústku
- střední rychlost byla určena z lokálních rychlostí průměrováním
- lokální rychlosti byly změřeny pro každé nastavení změřeny pětkrát
- lokální rychlosti byly zaznamenány do tabulky

Tabulka 8 Ukázka tabulky pro zápis rychlostí

Označení vyústky	číslo bodu	Číslo měření					
		1		2	3	4	5
		v [m/s]	t [°C]	v [m/s]	v [m/s]	v [m/s]	v [m/s]

- hustota byla vypočítána z teploty, která byla změřena při prvním měření rychlosti daného nastavení

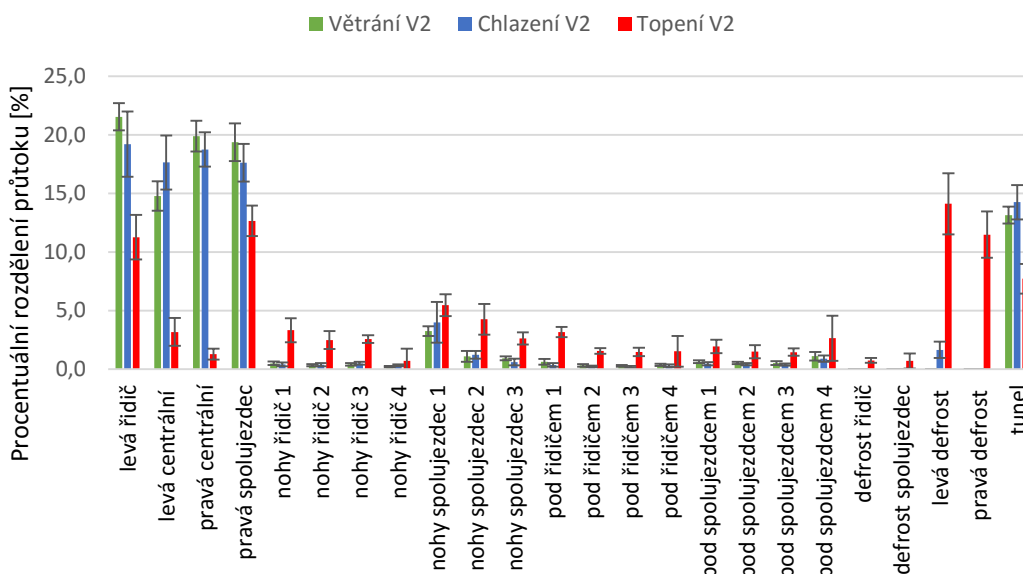
## 7.6 Vliv nastavení a klimatických podmínek na distribuci

V této podkapitole se zaměříme na vyhodnocení rozdílů v rozložení přívodu vzduchu v kabině automobilu při různých klimatických podmínkách. Pro porovnávání jsme nepoužili přímo hodnotu hmotnostního toku, ale bylo použito procentuální rozložení přiváděného vzduchu jednotlivými vyústkami.

### Bez preference místa přívodu vzduchu

Na Obr. 41 je rozložení přívodu vzduchu v případě, kdy jsme nezvolili na ovládacím panelu žádné preferované místo přívodu vzduchu. Toto nastavení můžeme považovat za základní nastavení.

## Bez preference



Obr. 41 Bez preference distribuce vzduchu

Z Obr. 41 je patrné, že procentuální rozložení hmotnostního toku v kabině automobilu je při tomto nastavení závislé na klimatických podmínkách. Dále si rozebereme rozložení toků při jednotlivých klimatických podmínkách.

Pokud se podíváme na rozložení hmotnostních toků při větrání (zelené sloupce), tak si můžeme všimnout, že hlavní část přiváděného vzduchu 75,6 % je přiváděna do oblasti těla posádky v přední části automobilu vyústkami na palubní desce. Značný podíl na přívodu vzduchu do kabiny automobilu má vyústka s označením tunel a to 13,6 %, která slouží k přívodu vzduchu do oblasti těla pro posádku v zadní části automobilu. Jedním z důvodů toho rozdělení je, že tento režim je používán především na jaře a na podzim. V těchto ročních obdobích mohou být venkovní teploty pod teplotou tepelného komfortu, který se pohybuje okolo 21 °C. Pro posádku automobilu by nebylo příjemné ani zdravotně vhodné, kdyby chladný vzduch byl přiváděn do oblasti nohou.

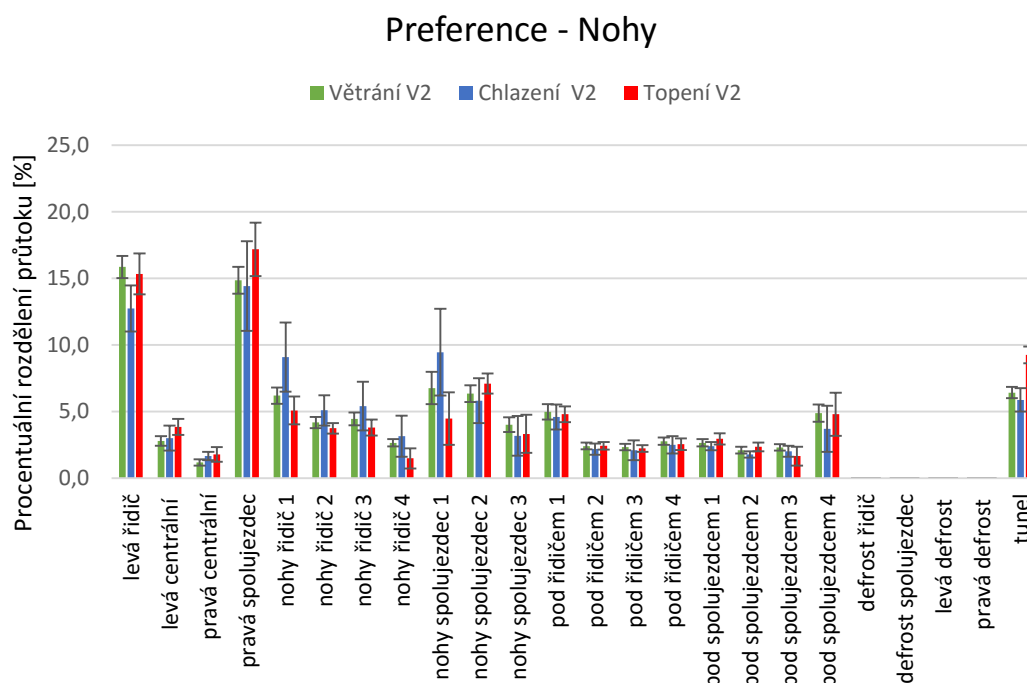
V případě chlazení (modré sloupce) je podobná situace jako při větrání. Největší množství přiváděného vzduchu je v oblasti těla posádky a to 73,2 %. 14,3 % přiváděného vzduchu připadá na posádku v zadní části automobilu a minimální množství je přiváděno do prostoru nohou. Při chlazení má toto rozložení distribuce několik pádných důvodů. Prvním je, že chceme ochladit tělo posádky. Další důvod je fakt, že chladný vzduch klesá k podlaze a ochlazuje i ostatní části těla, které nemusí být ve směru proudu. Posledním a neméně podstatným důvodem je fakt, který byl už popsán v minulém odstavci a to, že není vhodné přivádět chladný vzduch do oblasti nohou. Zvýšený přívod vzduchu v oblasti nohou je vyústkou *nohy spolujezdec 1*. To je dáno tím, že ŠKODA Octavia 3 má klimatizovanou schránku.

Posledním režimem je topení (červené sloupce). Při tomto režimu je situace odlišná. Do oblasti těla posádky v přední části automobilu je přiváděno 28,4 % a můžeme si všimnout, že přívod vzduchu je realizován především bočními vyústkami, které snižují vliv chladných ploch a zabraňují mlžení bočních okének. Do oblasti těla posádky v zadní části automobilu je přiváděno 7,7 %. Na ofukování předního skla, které

můžeme považovat za aktivní prvek bezpečnosti jízdy, připadá 25,6 % z hmotnostního toku. Do oblastí nohou posádky automobilu je přiváděno 36,8 % a to je dáno tím, že teplý vzduch stoupá vzhůru a lidé hodnotí přívod teplého vzduchu do oblasti nohou velmi kladně.

## Preference přívodu vzduchu do oblasti nohou

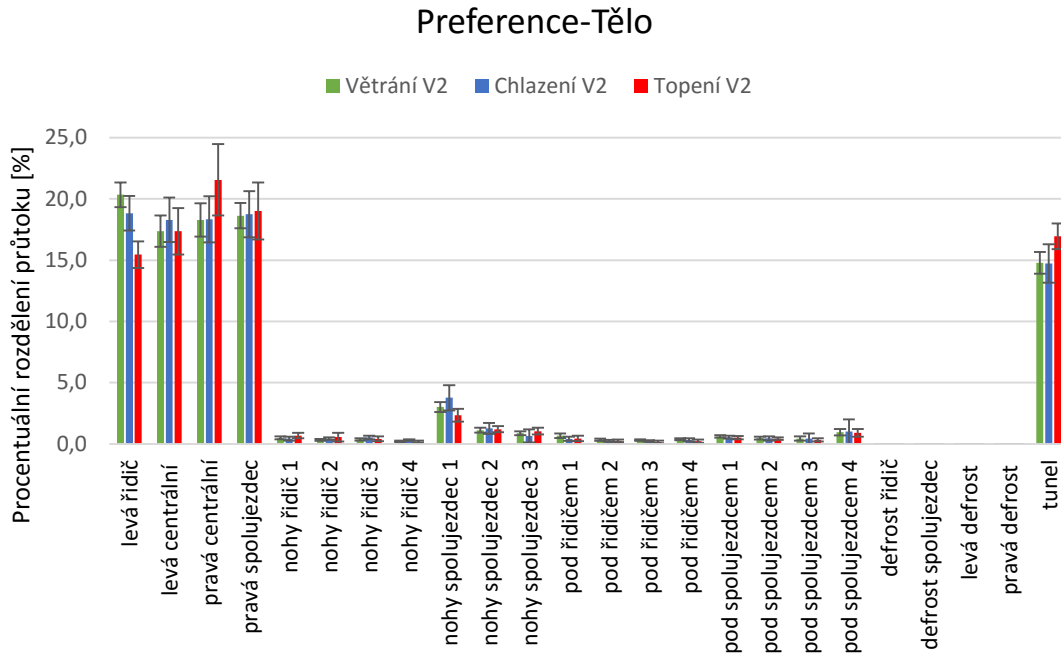
Na Obr. 42 je porovnání distribuce vzduchu při preferenci přívodu na nohy. Při tomto nastavení už není znatelný vliv režimu HVAC na rozložení distribuce a rozdíly jsou v rámci nepřesností měření. Hlavní část vzduchu je přiváděna vyústkami v prostoru nohou a to přibližně 55 %. Toto nastavení preference přívodu vzduchu má především využití v zimním období a proto přívod vzduchu na palubní desce je realizován bočními vyústkami pro eliminaci vlivu chladných ploch bočních okének. Na těchto výsledcích je rovněž patrné, že v rozvodné skříni topení jsou pro distribuci vzduchu k bočním vyústkám klapky, které neumožňují plně uzavřít přívod vzduchu k bočním vyústkám.



Obr. 42 Preference distribuce vzduchu na nohy

## Preference přívodu vzduchu do oblasti těla

Posledním režimem přívodu vzduchu je preference přívodu vzduchu do oblasti těla. Při tomto nastavení znovu nezáleží na režimu HVAC. 74 % V případě volby pouze tělo jsou v rozvodové skříni uzavřeny klapky směřující k nohám a vzduch proudí pouze vyústkami v palubní desce k předním sedadlům a tunelem k zadním.



Obr. 43 Preference distribuce vzduchu na tělo



## 8 Uspořádání dat pro matematický model

Hlavní motivací této diplomové práce je získání dat pro matematický model. Veškerá měření byla zpracována pomocí programu Microsoft Excel. Sešity jsou na přiloženém CD.

### 8.1 Charakteristika ventilátoru

Pro každé nastavení otáček je několik sešitů. Jedná se o čtyři soubory s čistými daty při různém nastavení škrcení. Vždy je přiložen soubor aplikace Microsoft Excel a původní soubor s následujícím značením.

nastavené otáčky – pořadí měření - režim škrcení – označení multifukční stanice

V4 – 1 – II – testo350 – 454

Program zapisoval hodnoty kontinuálně, proto byl vytvořen při měření další soubor, ve kterém jsou zaznamenány pořadí první hodnoty, kterou použijeme pro výpočet rychlosti v konkrétním bodě průřezu. Značení souborů je následující.

nastavené otáčky ventilátoru

V4

Výpočty průtoků jsou v posledním souboru. V každém souboru je pět listů. Na čtyřech listech jsou propojená data z měření při konkrétním škrcení, výběr pěti rychlostí v každém bodě měření rychlostního profilu, přepočtení rychlosti pomocí kalibrační křivky, výpočet nejistot, grafické znázornění rychlostního profilu. Na posledním listě je znázorněna křivka charakteristiky ventilátoru pro dané nastavení otáček.

vyhodnocení – nastavené otáčky

vyhodnocené – V4

Poslední a nejdůležitější soubor je *křivky\_po\_korekci\_propojená\_data*. Tento soubor má tři listy. Na prvním listě jsou propojeny výsledky z jednotlivých měření a tlaková charakteristika ventilátoru. Na druhém listě je vypočítaná výkonová charakteristika. Poslední list umožňuje přepočítat křivky pro konkrétní teplotu a tlak nasávaného vzduchu.

### 8.2 Rozložení distribuce vzduchu

Pro každé měřené nastavení je výpočet ve zvláštním souboru, ve kterém jsou následující listy: označení vyústek, označení měřících bodů, naměřené hodnoty, hodnoty po kalibraci, vyhodnocení teplot, vyhodnocení průtoků, grafy. Soubory jsou označeny podle následujícího klíče.

datum – nastavené otáčky – klimatické podmínky – místo preference

1.2.2016\_V2\_JP\_V

Porovnání výsledků bylo provedeno v dalších souborech s označením.

porovnání\_preferance přívodu vzduchu

porovnání\_nohy

Data z programu VAG-COM jsou v sešitech s označením:

datum\_otáčky ventilátoru\_teplota venku\_preferance místa

0102\_v2\_14C\_vse

## 9 Použitá technika

### 9.1 Klimatická komora

Pro simulování klimatických podmínek při měření distribuce vzduchu v kabině automobilu byla využita klimatická komora, která je k dispozici na OTTP. V této klimatické komoře lze simulovat

- teplotu vzduchu v rozsahu  $-40 - 80$  °C s přesností  $\pm 1$  °C
- relativní vlhkost v rozsahu 10 – 80 % a
- simulovat sluneční záření 0 – 1000 W/m<sup>2</sup>.

Rozměry této klimatické komory (8 x 5 x 3,5 m) a odsávání spalin umožňují měřit nastartovaný automobil.



*Obr. 44 Automobil v klimatické komoře a detail na odsávání spalin*

### 9.2 Autodiagnostika VAG - COM

Při měření bylo auto připojeno k počítači, který je vybaven programem VAG - COM, který slouží pro diagnostiku automobilu. : Abychom věděli, že se v průběhu měření nastavení nemění, sledovali jsme polohu rozváděcích klapek, napětí a proud ventilátoru, teplotu v kabině a přiváděného vzduchu.

### 9.3 Měření rychlosti

Pro měření rychlostí byly použity dvě multifunkční stanice od firmy TESTO v kombinaci s žhavenými anemometry.

K měření rychlostí u vyústek byla použita stanice *testo 435-4* v kombinaci se dvěma sondami a to *termickou sondou s integrovaným měřením vlhkosti a teploty* a *sondou se žhaveným drátkem*.

Tabulka 9 Vlastnosti sondy: Termická sonda s integrovaným měřením teploty a vlhkosti [16]

měřená veličina	rozsah	přesnost sondy
rychlost [m/s]	0 – 20	$\pm (0,03 + 4\% \text{ mv})$
teplota [°C]	-20 – 70	$\pm 0,3$

Tabulka 10 Vlastnosti sondy: Sonda se žhaveným drátkem [16]

měřená veličina	rozsah	přesnost sondy
rychlost [m/s]	0 – 20	$\pm (0,03 + 5\% \text{ mv})$
teplota [°C]	-20 – 70	$\pm 0,3$



Obr. 45 Testo 435-4



Obr. 46 Sonda se žhaveným drátkem nalevo a Termická sonda s integrovaným měřením vlhkosti a teploty napravo

Pro proměření rychlostního profilu při měření ventilátorové charakteristiky byla použita multifunkční stanice 350M/XL, testo 454 v kombinaci s kuličkovými anemometry.



Obr. 47 Testo 350 M/XL

Tabulka 11 Vlastnosti sondy: Anemometr se žhavenou kuličkou [17]

měřená veličina	rozsah	přesnost sondy
rychlost [m/s]	0 – 10	$\pm (0,03 + 5\% \text{ mv})$
teplota [°C]	-20 – 70	$\pm 0,3$

## 9.4 Měření tlakové difference

Pro měření tlakové difference při měření tlakové charakteristiky byla využita multifunkční stanice od firmy Testo s označením Testo 435-4. Tato stanice je přímo vybavena měřením tlakové difference.

Tabulka 12 Vlastnosti multifukční stanice [16]

měřená veličina	rozsah	přesnost sondy
diference tlaku [pa]	0 - 2500	$\pm 2 \text{ Pa (0 - 200)}$ $\pm 1 \% \text{ (zbytek rozsahu)}$



Obr. 48 Testo 435-4 s hadičkami od odběru tlaku

## 9.5 Kalibrace sond

U každého měřidla postupem času dochází ke zhoršování přesnosti. Aby bylo měřidlo možné používat, musí pravidelně probíhat kalibrace. Měřidla jsou kalibrována v certifikovaných laboratořích, které mají navázaná měřidla na Český metrologický ústav. Laboratoř provede kalibraci a nahraje kalibrační křivku přímo do přístroje, nebo dodá rovnici, se kterou lze přepočítat naměřené hodnoty.

K zapůjčeným sondám (anemometr se žhavenou kuličkou) jsme dostali i regresní křivky, které slouží k přepočtu výsledků. Křivky byly změřeny pro rozmezí rychlostí 0.5 - 3.5 m/s. Tento rozsah kalibrace se ukázal jako nedostatečný, neboť v extrémních podmínkách jsme naměřili rychlosti přiváděného vzduchu u vyústek přes 8 m/s. Protože tedy stávající křivky nebyly změřeny v rozsahu rychlostí, které by vyhovovaly našemu měření, rozhodli jsme se změřit křivky nové, které nám umožní zpřesnit měření.

Měření regresních křivek bylo provedeno pomocí *DANTEC DYNAMICS StreamLine Pro*. Rozsah rychlostí, které lze nastavit na kalibrátoru je 0,5 – 60 m/s. Přesnost kalibrátoru je o dva řády vyšší než přesnost sond.



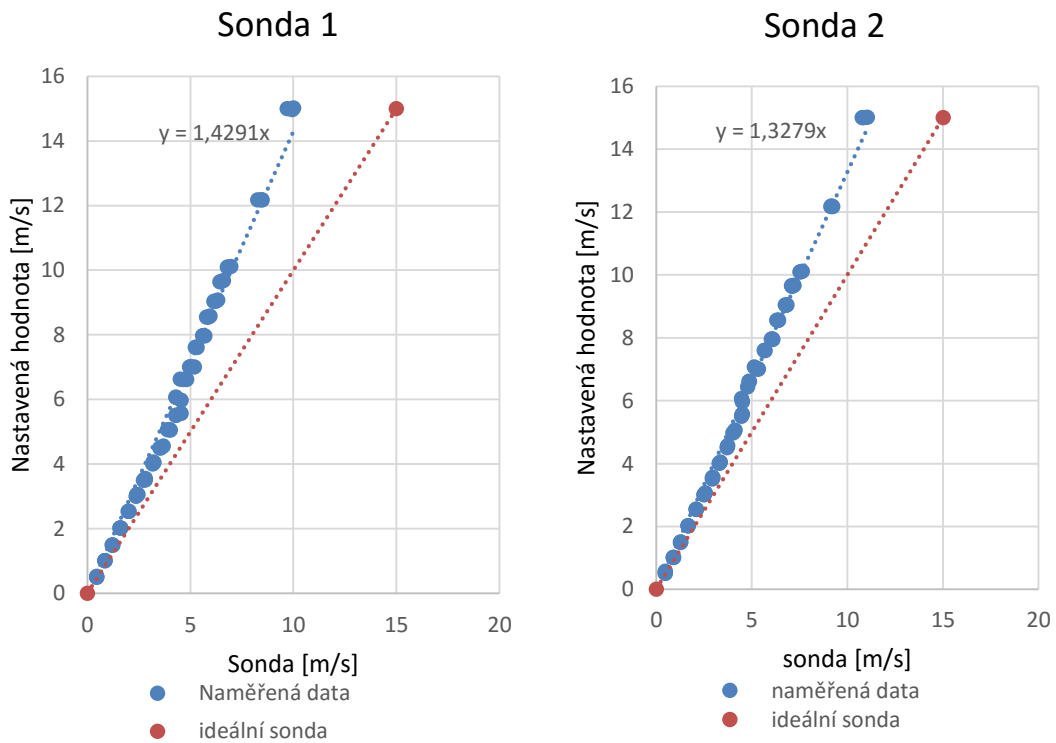
Obr. 49 Dantec dynamics StreamLine Pro

Pro naše účely postačuje regresní křivka v rozsahu rychlostí 0,5 – 15 m/s. Rozsah byl rozdělen do 22 měřených bodů. Věděli jsme, že budeme měřit především nižší rychlosti a to do 10 m/s. Proto byly body zvoleny takto: od 0,5 do 10 m/s po 0,5 m/s, 12 a 15 m/s.



Obr. 50 Ukázka umístění měřících sond při měření

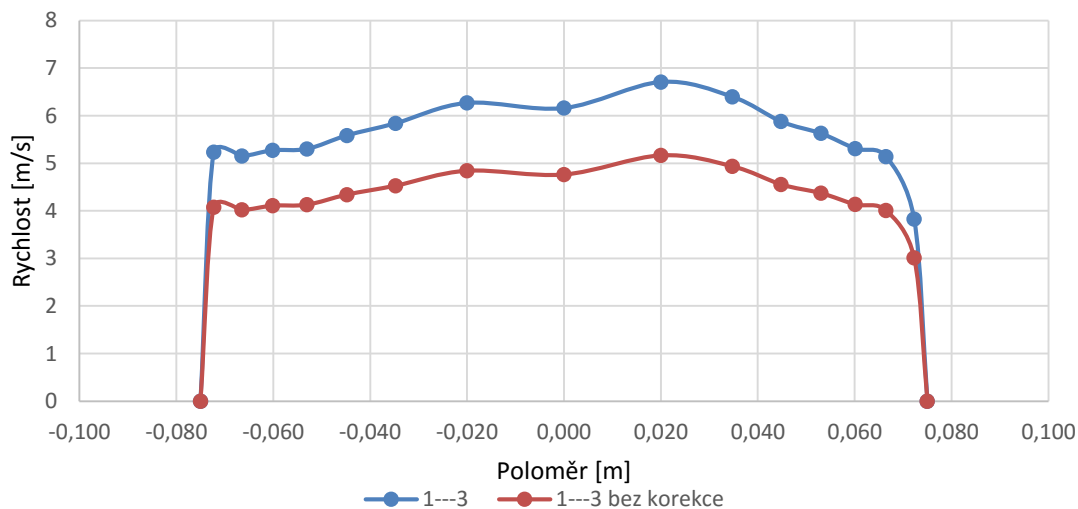
Rozsah byl změřen pro obě sondy třikrát, ze všech hodnot dané sondy byla vyhodnocena lineární regresní křivka, která byla použita pro zpřesnění naměřených výsledků.



Obr. 51 Regresní křivky pro sondy 1 a 2 (Anemometr se žhavenou kuličkou)

Z grafu regresních křivek pro sondu 1 a 2 lze vyčíst, že sondy měří oproti ideální sondě menší rychlost, než je nastavena na kalibrátoru. Ideální sonda by byla taková sonda, která by měřila stejnou hodnotu rychlosti, jaká by byla nastavena na kalibrátoru. Hodnota spolehlivosti  $R^2$  nabývá hodnoty mezi 0 – 1. Tuto hodnotu lze interpretovat jako shodu bodů regresní křivky s naměřenými hodnotami. Čím více se hodnota blíží 1 (100%), tím více vypočítaná rovnice reprezentuje skutečné hodnoty.

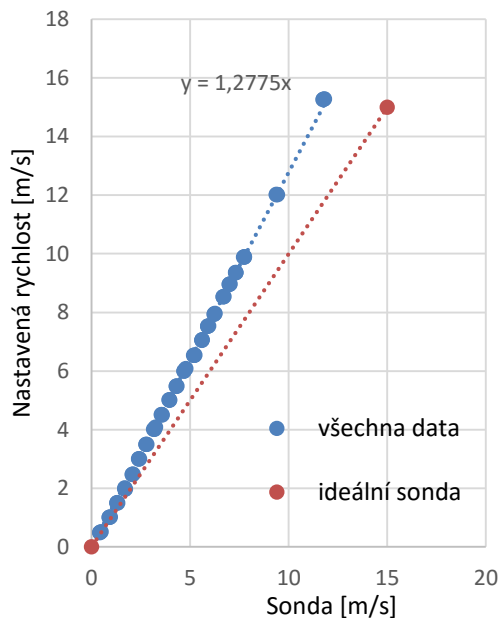
Vliv korekce sondy 2, rychlostní profil 1-3, V4



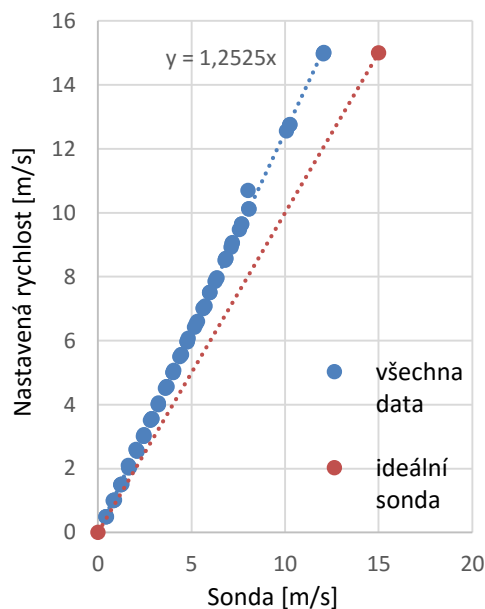
Obr. 52 Vliv korekce sondy 2 na rychlostní profil

Z předešlé zkušenosti s kuličkovými sondami, viz Obr. 52, které jsou na OTTP používány už 16 let, jsme se rozhodli provést kontrolní měření i pro rychlostní sondy k Tesco 435. Postup byl shodný s měřením.

Sonda 3



Sonda 4



Obr. 53 Regresní křivka sond pro Testo 435-4

Po vyhodnocení kontrolního měření bylo rozhodnuto, že se pro zpřesnění výsledků vypracují a použijí regresní křivky pro všechny použité sondy.

Z hlediska opakovatelnosti měření sondy vykazovali velmi přesné hodnoty, rozptyl byl minimální. Ovšem naměřené absolutní hodnoty rychlosti ve všech případech vykazovaly významnou odchylku oproti kalibrátoru. Podobné výsledky kalibrace všech třech typů sond nás vedli k podezření, zdali je kalibrátor v pořádku. Vzhledem k tomu, že jako jediný má garantovanou kalibraci výrobcem, tato úvaha byla zamítnuta. Ovšem možným zdrojem chyb při kalibraci je to, že byly použity anemometry s ohrádkou nebo kuličkové, které jsou rozměrnější oproti drátkovým CTA sondám, což by mohlo vést ke zkreslení výsledků kalibrace. Kalibrace použitých rychlostních sond poukázala na to, že jejich kalibraci je potřeba provádět častěji, neboť charakteristika čidla se postupným stárnutím může měnit.



## ZÁVĚR

Diplomová práce měla dva hlavní cíle. První cíl této práce bylo změření distribuce vzduchu v kabině automobilu při různých nastavení HVAC. Druhým cílem bylo změřit tlakovou charakteristiku ventilátoru. Obě měření byly provedeny na automobilu ŠKODA OCTAVIA třetí generace.

Práce je rozdělena na dvě hlavní části a to část rešeršní a část praktickou.

Na začátku rešeršní části jsou popsány funkce klimatizace v měřeném automobilu, mezi které patří větrání, topení a chlazení. Další část se zaměřuje na popis proudění vzduchu z vyústek. Třetí část je věnována popisu průtoku, metod měření průtoku a výběru nejvhodnější metody pro část praktickou. Nejvhodnější metoda z pohledu časové náročnosti a dostupných měřidel na OTTP byla měření průtoku pomocí střední rychlosti a plochy vyústky. Střední rychlost byla určena z lokálních rychlostí.

Na začátku praktické části je popis charakteristik ventilátoru a postup měření. Dopravní tlak je měřen diferencí tlaků před a za ventilátorem. Průtok je měřen na straně sání v ustalovacím kanále z lokálních rychlostí. Z výsledků měření je sestaven graf tlakové a výkonové charakteristiky ventilátoru. V další části je popis postupu měření distribuce vzduchu v kabině automobilu a zvolené parametry venkovních podmínek a nastavení klimatizace automobilu. Pro porovnání výsledků při různých klimatických podmínkách jsou využita procenta rozložení distribuce vzduchu, které jsou vložena do grafu. V poslední části jsou shrnuta měřidla, která byla při měření použita a postup jejich kalibrace.

Z měření vyplývá, že předefinované distribuce pro nastavení bez volby místa distribuce jsou vztaženy k venkovním podmínkám a jsou navrženy tak, aby přispívaly k bezpečnosti a tepelné pohodě při klimatických podmínkách. Pokud zvolíme místo distribuce nohy, tak mapa distribuce je navržena tak, aby zachovala bezpečnost při jízdě. To je patrné z toho, že stále velké procento vzduchu vstupuje do kabiny vyústkami, které ofukují okénka u řidiče a spolujezdce a tím je zabráněno mlžení. Při volbě preference ofukování těla je skoro veškerý vzduch přiváděn vyústkami na palubní desce.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN ISO 7730. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [2] DALY, Steven. *Automotive air-conditioning and climate control systems*. 1st ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006.
- [3] ZIKÁN, Zdeněk. Oxid uhličitý - utajený nepřítel. *TZB-info* [online]. 2011, **2011**(), - [cit. 2016-04-23]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/7132-oxid-uhlicity-utajeny-nepritel>
- [4] Je třeba měnit chladicí kapalinu? Ano. In: *Autosalon.iprima* [online]. 2016 [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://autosalon.iprima.cz/clanky/je-treba-menit-chladici-kapalinu-ano>
- [5] Klimatizace. *Autoform* [online]. b.r. [cit. 2016-05-08]. Dostupné z: <http://www.autoform.cz/klima.htm>
- [6] JANOTKOVÁ, Eva. *TECHNIKA PROSTŘEDÍ I. část* [online]. 2014, s. 58 [cit. 8.4.2016]. Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>
- [7] ZMRHAL, Vladimír a Miloš LAIN. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (II) - 1. část: Distribuce vzduchu. *Tzb-info* [online]. 2007, () [cit. 2016-04-08]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/4077-prvky-vetracich-a-klimatizacnich-zarizeni-ii-1-cast>
- [8] PAVELEK, Milan a Josef ŠTĚTINA. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 3., V Akademickém nakladatelství CERM 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007, 215 s.
- [9] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 447 s.
- [10] HORÁK, Jiří, František HOPAN, Kamil KRPEC, Petr KUBESA, Lubomír MARTINÍK a Milan DEJ. Měření základních fyzikálních veličin potřebných při měření emisí znečišťujících látek – 1. část. *.tzb-info* [online]. 2014, (-) [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: <http://vytapani.tzb-info.cz/teorie-a-schemata/11357-mereni-zakladnich-fyzikalnich-velicin-potrebnych-pri-mereni-emisi-znecistujicich-latek-1-cast>
- [11] 4.5 Měření průtoku a proteklého množství. *Uprt.vscht* [online]. 2005 [cit. 2016-03-05]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.htm>

- ZMRHAL, Vladimír. Prvky větracích a klimatizačních zařízení (I) - 1. část:  
[12] Ventilátory. *TZB-info* [online]. 2006, (-) [cit. 2016-03-29]. Dostupné z:  
<http://www.tzb-info.cz/3733-prvky-ventracich-a-klimatizacnich-zarizeni-i-1-cast>
- ČSN EN ISO 5801. *Průmyslové ventilátory - Zkoušení výkonu s použitím  
[13] normalizovaného vzduchovodu*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- ČSN 12 3061. *Vzduchotechnika. Ventilátory. Předpisy pro měření*. Praha: ÚNMZ,  
[14] 1986.
- ŠKORPÍK, Jiří. Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny. *Transformační  
[15] technologie* [online]. Brno, 2010, **2010**(12), 12 [cit. 2016-04-18]. Dostupné z:  
<http://www.transformacni-technologie.cz/vznik-tlakove-ztraty-pri-proudeni-tekutiny.html>.
- [16] *Testo 435: Multifunction measuring instrument*. V02.10en. Lenzkirch, 2006.
- [17] *Testo 350M/XL testo 454: Instruction manual*. Lenzkirch, b.r..

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka	popis
OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prostředí
HVAC	Vytápění, větrání, chlazení

Symbol	Popis	Jednotka
$F_G$	gravitační síla	[N]
$F_p$	unášivá síla	[N]
$F_v$	vztlaková síla	[N]
$K_s$	konstanta vyústky	[-]
$P$	příkon	[W]
$Pr$	prandltovo číslo	[-]
$Q$	tepelný tok	[W]
$Q_m$	hmotnostní průtok	[kg/s]
$Q_v$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s]
$R$	odpor	[ $\Omega$ ]
$Re$	reinoldsovo číslo	[-]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$S_0$	plocha vyústky	[m <sup>2</sup> ]
$T$	teplota	[K]
$T_0$	teplota vzduchu ve vyústce	[K]
$T_\infty$	teplota okolí	[K]
$T_i$	teplota vzduchu v prostoru	[K]
$T_w$	teplota tělíska	[K]
$U$	rozšířená nejistota	[dle veličiny]
$\Delta m$	přírůstek hmotnosti	[kg]
$\Delta t$	přírůstek času	[s]
$\Delta V$	přírůstek objemu	[m <sup>3</sup> ]
$c$	měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
$d$	průměr	[m]
$g$	gravitační zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$I$	proud	[A]
$l_0$	charakteristický rozměr	[m]
$m$	hmotnostní tok	[kg/s]
$n$	otáčky	[ot/s]
$p$	tlak	[Pa]
$p_c$	celkový tlak	[Pa]
$p_d$	tlak dynamický	[Pa]
$p_s$	tlak statický	[Pa]
$p_{z1-2}$	tlaková ztráta	[Pa]
$r$	měrná plynová konstanta ideálního plynu	[J/kgK]
$r_i$	průměr	[m]

$u_{Ay}$	nejistota typu A	[dle velčiny]
$u_{By}$	nejistota typu B	[dle velčiny]
$u_{cy}$	celková nejistota	[dle velčiny]
$v$	měrný objem	[m <sup>3</sup> /kg]
$w$	střední rychlost	[m/s]
$w_0$	rychlost proudění u vyústky	[m/s]
$w_x$	rychlost ve vzdálenosti $x$	[m/s]
$x$	vzdálenost od pólu	[m]
$x_i$	poloha od stěny	[m]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> K]
$\vartheta$	úhel rozšíření proudu	[rad]
$\rho$	hustota	kg/m <sup>3</sup>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Schéma HVAC [2].....	15
Obr. 2 Tlakové poměry při jízdě automobilu [2].....	16
Obr. 3 Schéma chladicí smyčky motoru automobilu [4] .....	16
Obr. 4 Schéma okruhu chlazení [5] .....	17
Obr. 5 Cyklus chladiva v p-h diagramu .....	17
Obr. 6 Schéma izotermního proudu z kruhové vyústky (nahradit vlastním) [6] .....	20
Obr. 7 Označení veličin při proudění.....	23
Obr. 8 Označení veličin pro Bernoulliho rovnici.....	26
Obr. 9 Clona a průběh statického tlaku.....	27
Obr. 10 Venturiho trubice .....	28
Obr. 11 Dýza .....	28
Obr. 12 Jednorázové měřidlo průtoku pro plyny .....	29
Obr. 13 Mokrý plynoměr .....	30
Obr. 14 Membránový plynoměr.....	30
Obr. 15 Rotametr.....	31
Obr. 16 Průtokoměr využívající kalorimetrii.....	31
Obr. 17 Průtokoměr s axiálním tokem .....	33
Obr. 18 Průtokoměr s tangenciálním tokem .....	33
Obr. 19 Lopatkový anemometr .....	35
Obr. 20 Vrtulkový anemometr .....	36
Obr. 21 Miskový anemometr .....	36
Obr. 22 Termoanemometry.....	37
Obr. 23 Dynamické sondy .....	39
Obr. 24 Dynamické sondy .....	39
Obr. 25 Znázornění základní a rozšířené nejistoty .....	41
Obr. 26 Tlakové odběry .....	44
Obr. 27 Označení bodů na sací mřížce .....	45
Obr. 28 Rychlosti v bodech na sací mřížce V2.....	45
Obr. 29 Ustalovací kanál instalován na automobilu .....	46
Obr. 30 Redukce pro připojení ustalovacího kanálu.....	46
Obr. 31 Náčrt měření a označení poloh bodů na sondách napravo sonda 1 nalevo sonda 2 .....	47
Obr. 32 Rychlostní profil .....	47
Obr. 33 Výkonová charakteristika ventilátoru.....	48
Obr. 34 Tlaková charakteristika ventilátoru .....	49
Obr. 35 Procentuální zastoupení toků jednotlivými vyústkami.....	51
Obr. 36 Ovládací panel ŠKODA Octavia 3 .....	52
Obr. 37 Moodyho diagram [15] Součinitel tření: .....	53
Obr. 38 Vliv nastavení otáček na rozložení toků.....	54
Obr. 39 Označení vyústek v ŠKODA Octavia 3. generace .....	56
Obr. 40 Poloha bodů lokálních rychlostí .....	57
Obr. 41 Bez preference distribuce vzduchu .....	59
Obr. 42 Preference distribuce vzduchu na nohy .....	60
Obr. 43 Preference distribuce vzduchu na tělo .....	61
Obr. 44 Automobil v klimatické komoře a detail na odsávání spalin.....	65
Obr. 45 Testo 435-4 .....	66
Obr. 46 Sonda se žhaveným drátkem nalevo a Termická sonda s integrovaným měřením vlhkosti a teploty napravo.....	66

Obr. 47 Testo 350 M/XL .....	67
Obr. 48 Testo 435-4 s hadičkami od odběru tlaku .....	67
Obr. 49 Dantec dynamics StreaLine Pro .....	68
Obr. 50 Ukázka umístění měřících sond při měření .....	69
Obr. 51 Regresní křivky pro sondy 1 a 2 (Anemometr se žhavenou kuličkou) ..	69
Obr. 52 Vliv korekce sondy 2 na rychlostní profil .....	70
Obr. 53 Regresní křivka sond pro Testo 435-4 .....	70

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Koeficient $ka$ .....	42
Tabulka 2 Vzorce pro přepočet charakteristik ventilátoru.....	43
Tabulka 3 Rozložení bodů .....	46
Tabulka 4 Přehled výsledků charakteristik ventilátorů.....	48
Tabulka 5 Nastavení při měření vlivu ventilátoru .....	54
Tabulka 6 Nastavení při měření distribuce vzduchu.....	55
Tabulka 7 Označení vyústek .....	56
Tabulka 8 Ukázka tabulky pro zápis rychlostí.....	58
Tabulka 9 Vlastnosti sondy: Termická sonda s integrovaným měřením teploty a vlhkosti [16] .....	66
Tabulka 10 Vlastnosti sondy: Sonda se žhaveným drátkem [16] .....	66
Tabulka 11 Vlastnosti sondy: Anemometr se žhavenou kuličkou [17] .....	67
Tabulka 12 Vlastnosti multifukční stanice [16].....	67