

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Optické měření proudění uvnitř skříně šroubového kompresoru

Autor: **Václav Koudelka**  
Vedoucí práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

## **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 .....

.....

Václav Koudelka

## **Poděkování**

Děkuji RNDr. Danielu Dudovi, Ph.D. za odborné vedení práce, věcné připomínky, rady a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce. Dále děkuji doc. Ing. Vitalii Yanovychovi, D.Sc. a prof. Ing. Václavu Urubovi, CSc. za praktické rady a pomoc při přípravě a vyhodnocování experimentu. Poděkování náleží i Ing. Vítu Linhartovi a firmě Atmos Chrást s.r.o. za poskytnutí kompresoru, pomoc při přípravě experimentu a financování experimentu.

# ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Koudelka	Jméno Václav			
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 - Stavba energetických strojů a zařízení				
<b>VEDOUČÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) RNDr. Duda, Ph.D.	Jméno Daniel			
<b>PRACOVISTĚ</b>	ZČU - FST - KKE				
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>		Nehodící se škrtněte	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Optické měření proudění uvnitř skříně šroubového kompresoru				
<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2020

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	44	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	44	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>					
<b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>					
		Bakalářská práce charakterizuje chování proudění vzduchu ve skříně za chladičem pojízdného šroubového kompresoru od firmy Atmos Chrást s.r.o. za pomoci Laserové Dopplerovské Anemometrie (LDA). Práce má za cíl změřit rychlosti v důležitých bodech, vypočítat z nich charakteristické veličiny a následně výsledky interpretovat vzhledem k poloze bodů za vrtulí a chladičem.			
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>					
<b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>					
		Mechanika tekutin, šroubový kompresor, Laserová Dopplerovská Anemometrie, měření rychlosti, stopovací částice, charakteristika proudění			

## SUMMARY OF BACHELOR SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Koudelka	<b>Name</b> Václav			
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 – Design of power system machines and equipment				
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> RNDr. Duda, Ph.D.	<b>Name</b> Daniel			
<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>	Optical flow measurement inside screw compressor casing				
<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KKE	<b>SUBMITTED IN</b>	2020

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

<b>TOTALLY</b>	44	<b>TEXT PART</b>	44	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
<b>BRIEF DESCRIPTION</b>  <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This bachelor's thesis characterizes the behavior of an air flow in the casing behind the radiator of a mobile screw compressor from the company Atmos Chrást s.r.o. using Laser Doppler Anemometry (LDA). The work aims to measure velocities at important points, calculate the characteristic quantities from them and then interpret the results with respect to the position of the points behind the propeller and cooler.</p>				
<b>KEY WORDS</b>	<p>Fluid mechanics, screw compressor, Laser Doppler Anemometry, velocity measurement, tracking particles, flow characteristics</p>				

## Obsah

1. Úvod.....	9
2. ATMOS Chrást s.r.o. ....	10
2.1. Historie firmy .....	10
2.2. Současný výrobní program .....	11
3. Popis experimentu .....	18
3.1. Princip metody LDA .....	19
3.2. Kompresor PDP-28 .....	19
3.3. Sledované oblasti .....	20
3.4. Zpracování dat.....	21
4. Příprava experimentu.....	22
4.1. Kalibrace LDA a nastavení BSA Flow .....	22
4.2. Úprava kompresorové skříně a kompresoru .....	23
4.3. Nastavení a kalibrace 3D traverzéro .....	24
4.4. Zajištění sycení stopovacími částicemi.....	25
5. Průběh experimentu.....	26
5.1. Stanovení kroku a počtu vzorků .....	26
5.2. Úprava počtu vzorků.....	26
5.3. Zjištění chyb v měření .....	27
5.4. Přeměření chybných bodů.....	27
6. Charakteristické veličiny .....	28
6.1. Střední rychlost .....	28
6.2. Šikmost .....	29
6.3. Špičatost.....	30
6.4. Intenzita fluktuací podélné složky rychlosti .....	31
6.5. Průměrná frekvence vzorkování .....	32
6.6. Průměrná rychlost .....	33
6.7. Zastoupení kladných a záporných rychlostí.....	34
6.8. Směrodatná odchylka.....	35
6.9. Variance .....	36
6.10. Celkový čas .....	37
7. Charakteristika proudění.....	38
7.1. Vyhodnocení dat jako celku.....	40
8. Závěr.....	41
9. Seznam použité literatury .....	42

9.1. Knižní zdroje.....	42
9.2. Internetové zdroje .....	42
10. Citovaná literatura.....	43
11. Zdroje obrázků.....	43

## Přehled použitých zkratek a symbolů

Uvedeny jsou pouze zkratky, které nepatří mezi běžně používaná označení veličin ( $t$  = čas,  $f$  = frekvence,  $v$  = rychlost), jejich jednotek (m/s – metr za sekundu) a jejich násobků (mm = milimetr). Další použité zkratky, symboly a značení fyzikálních veličin jsou v práci vždy uvedeny v místě, kde se vyskytují.

LDA – „Laser Doppler Anemometry“ – metoda měření rychlosti tekutin za pomoci laseru

BSA Flow – software, který je určený pro zaznamenávání výsledků změřených za pomoci

LDA, označení od výrobce

PIV – „Particle Image Velocimetry“ – metoda sloužící pro měření vektorů rychlosti a vírů v tekutinách za pomoci krátkých záblesků laseru

HWA – „Hot Wire Anemometry“ – metoda sloužící pro měření rychlosti proudění za pomoci elektrického odporu žhaveného drátku

PTA – „Pressure Tube Anemometry“ – metoda sloužící pro měření tlaků a rychlosti proudění

Sahara – velká vrtule před chladičem udržující proudění chladicího vzduchu skrz chladič.

Ve studovaném kompresoru PDP 28 má 8 listů

SD – směrodatná odchylka

RMS – „*root mean square*“

T – časový úsek

$t_0$  – počáteční čas



## 1. Úvod

Turbulentní proudění je proudění viskózní tekutiny, při kterém dochází k vzájemnému promíchávání proudnic. Částice tekutiny s turbulentním prouděním mají různou rychlost a vykonávají kromě posunu i rotační pohyb, který vede ke vzniku vírů. Tento druh proudění je z hlediska chlazení velice důležitý, protože zefektivní přenos tepla díky tomu, že víry velice účinně promíchávají, a tím pádem i odnášejí za pomoci proudícího vzduchu tepelnou energii vycházející z chladiče.

Oproti laminárnímu proudění sice turbulence zvyšují ztráty, ale vysokou mírou přispívají k účinnému chlazení, neboť difuzivita daná turbulencí je významně větší než difuzivita molární. Velice podobně lze definovat turbulentní viskozitu, která oproti molekulové viskozitě ukazuje, jak intenzivně je za pomoci turbulence přenášená hybnost napříč proudem. Ideální turbulence je tedy taková, při které se efektivně odvádí teplo a zároveň není tak velká, aby zabránila plynulému odtoku chladícího média, v tomto případě vzduchu.

Turbulence jsou příliš složité a při současné úrovni matematiky je nelze popsat analyticky, proto se v mnoha praktických aplikacích pro bližší popis daného proudění spíše užívá experimentálních či numerických metod. V této práci se pracuje s experimentální metodou Laserové Dopplerovské Anemometrie (LDA). Tato metoda je založená na Dopplerově jevu a měří změnu frekvence laserového záření rozptýleného stopovacími částicemi v proudící tekutině. V důsledku Dopplerova jevu je změněna frekvence světla rozptýleného na částici o hodnotu, jež souvisí s její geometrií rozptylu a rychlostí.

## 2. ATMOS Chrást s.r.o.

### 2.1. Historie firmy

Pracoviště, se kterým spolupracujeme, se nachází v Chrástu u Plzně a má již dlouholetou tradici ve strojírenské výrobě, jak je patrné z popisu historie firmy, který je převzat ze stránek firmy<sup>1</sup>:

Původ strojírenské výroby v areálu firmy ATMOS Chrást se traduje již od roku 1899, kdy pánové Suchý, Jouza a Čáp založili slévárnu a strojírnou.

V roce 1948 byla znárodněna a začleněna do n.p. ŠKODA Plzeň, která v roce 1987 zahájila licenční výrobu šroubových bloků B 100 a vývoj šroubových kompresorů (SKD 200, SKD 201, SKD 202 a SKE 200 S) až do roku 1992, kdy ŠKODA a.s. výrobu kompresorů zastavila a závod v Chrástu nabídla k prodeji. Nový majitel, firma Liška a Kraus kompresory, s.r.o., získal továrnu včetně značky ATMOS a dlouholetého "know-how" ve výrobě kompresorů. Okamžitě byl zahájen vývoj nových řad mobilních i stacionárních šroubových kompresorů a do konce roku 1994 byla zavedena výroba 16 nových typů kompresorů.



[Obr. 1] Dobové vyobrazení společnosti ATMOS Chrást s.r.o.

Na podzim roku 1993 byla zapsána změna názvu společnosti na ATMOS Chrást, s.r.o. V letech 1994 až 1996 se výrobní program rozšířil o dalších 10 typů a ATMOS Chrást, s.r.o. vyráběl ucelené typové řady pojízdných, lokomotivních a stacionárních kompresorů. Po úspěšné modernizaci výroby šroubového bloku B 100 bylo zahájeno osvojování výroby většího bloku B 260, který byl zařazen do sériové výroby v roce 1998.

V letech 1997 až 1999 byla uvedena na trh řada stacionárních kompresorů (SEC) nové generace. Při vývoji byl věnován maximální důraz na snížení hlučnosti, dosažení špičkových výkonnostních parametrů při zachování tradiční robustnosti konstrukce jako záruky životnosti stroje. Nové kompresory byly přijaty velmi příznivě na domácím trhu i exportních trzích.

Byla vyvinuta i nová řada pojízdných kompresorů (PD) poháněných nejnovějšími modely motorů Deutz, později Perkins a Daihatsu Vanguard určená pro prodej po celém světě.

Průlomovým krokem bylo koncem roku 1998 zavedení výroby řady malých kompaktních šroubových kompresorů Albert (E) revoluční koncepce. Sortiment kompresorů Albert je trvale rozšiřován. V současné době se již vyrábí 64 různých typů a modifikací se jmenovitým výkonem motorů od 3 do 22 kW a širokou škálou volitelného příslušenství. Další významný inovační krok učinila společnost ATMOS Chrást, s.r.o. v roce 2002. Technický vývoj započatý již v roce 1996 vyústil v zásadní rozšíření výrobního programu společnosti. Na trh byl uveden rozsáhlý sortiment motorgenerátorů AT. V současné době disponujeme kompletní řadou generátoru, která dokáže pokrýt požadavky širokého spektra zákazníků (záložní zdroje, půjčovny stavebního vybavení, aj.).<sup>1</sup>

## **2.2. Současný výrobní program**

V současné době se společnost ATMOS Chrást s.r.o. zabývá vývojem, konstrukcí a výrobou šroubových kompresorů, pístových kompresorů a generátorů. Základní rozdělení kompresorů je na elektrické a pojízdné dieselové a benzínové. Elektrické kompresory se dělí do řad Albert, SEC a SMARTRONIC, dieselové pojízdné do řad PDP 28 Perkins, PDK Kubota, PDC Caterpillar, benzínové řady PB Vanguard a speciální lokomotivní kompresory.

Řada Albert je nejmenší elektrický šroubový kompresor, který ATMOS Chrást s.r.o. vyrábí. Jeho výkon se dle specifikací pohybuje od 3 do 20 kW. Tato řada je určena především pro profesionální dílenské použití, převážně pro pohon pneumatického nářadí, CNC obráběcích center, balicích linek, vodáren a menší lakovny. Jmenovitá výkonnost se pohybuje mezi 0,5 – 3,3 m<sup>3</sup>/min.



[Obr. 2] Elektrický kompresor Albert E.50

SEC je řada stacionárních kompresorů o výkonu 22 – 37 kW. Hlavní výhodou těchto stacionárních kompresorů je nezávislý a odpružený rám, který minimalizuje vibrace přenášené do okolí. Jmenovitá výkonnost se pohybuje mezi 2,4 – 6,3 m<sup>3</sup>/min v závislosti na dané specifikaci.



[Obr. 3] Stacionární elektrický kompresor SEC 372

SMARTRONIC je řada stacionárních kompresorů o výkonu 30 – 110 kW. U této řady bylo dbáno především na co nejnižší provozní náklady. Je osazena šroubovými bloky A150, největšími, které firma vyrábí. Jmenovitá výkonnost se v závislosti na specifikaci a požadovaném tlaku vzduchu na výstupu pohybuje mezi 5,2 – 19,1 m<sup>3</sup>/min.



[Obr. 4] Stacionární elektrický kompresor SMARTRONIC 90 VARIO

PD Perkins je řada pojízdných diesellových šroubových kompresorů o výkonu 15,3 – 186 kW, které jsou určeny primárně do těžkých podmínek na staveništích. Jsou navrženy, aby vydržely a byly schopny startovat jak za extrémně nízkých, tak za extrémně vysokých teplot a za vysoké úrovně prašnosti. Jejich jmenovitý výkon se pohybuje mezi 2 – 24,8 m<sup>3</sup>/min v závislosti na specifikacích. Tato řada se velmi výrazně liší i rozměry jednotlivých specifikací.



[Obr. 5] Pojízdný diesellový šroubový kompresor PDP 35

PD Kubota je nová řada, která aktuálně obsahuje pouze jeden model a to PDK 33. Jedná se o upravenou řadu PD Perkins, ale místo motorů Perkins je PDK osazeno motory Kubota z Japonska. Jedná se taktéž o kompresory určené pro pohon pneumatických strojů na staveništích.



[Obr. 6] *Pojízdný dieselový šroubový kompresor PDK 33*

PD Caterpillar je největší řada s dieselovým motorem Caterpillar o konstantní rychlosti. U těchto kompresorů je kladen důraz převážně na robustnost, vysoký objem a tlak dodávaného vzduchu s ohledem na nízkou spotřebu paliva a co nejdelší životnost. Tato řada obsahuje dva modely, PDC90 a PDC190. Je zde velká výkonová rezerva, motory tedy nemusí běžet na vysoké otáčky, čímž se prodlužuje jejich životnost. Kompresor dokáže za studena startovat až při teplotách  $-40^{\circ}\text{C}$ .



[Obr. 7] *Pojízdný dieselový šroubový kompresor PDC190*

PB Vanguard je nejmenší řada šroubových kompresorů, které jsou poháněny benzínovými motory značky Vanguard. Kompresory o výkonu 6 bar jsou určeny především pro pohon sbíječek, menších podvrtávačů (tzv. krtků), 10 a 12 bar verze pro speciální práce jako např. tryskání či zafukování optovláken. Hmotnost těchto kompresorů je pouhých 135 kg a díky kolečkům jsou určeny pro pohodlnou manipulaci v jedné osobě.



[Obr. 8] Pojízdný benzínový kompresor PB80

LE/SE jsou velice specifické řady kompresorů, které se montují do železničních vozidel, kde zajišťují dodávku stlačeného vzduchu pro brzdné systémy. Tyto kompresory se vyrábějí na míru přímo zákazníkovi a jsou schopny operovat v teplotním rozsahu okolí od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $+55^{\circ}\text{C}$  v nepřetržitém režimu.



[Obr. 9] Lokomotivní kompresor LE 300

Perfect je řada pístových kompresorů, u kterých se o stlačování vzduchu stará pomaloběžný průmyslový agregát. Využití kompresorů této řady je především při menších průmyslových provozech nebo u větších řemeslníků, kteří nepotřebují vysoký dodávaný objem vzduchu. Vzhledem ke konstrukci a plně automatickému provozu není třeba téměř žádná údržba a jedná se o cenově dostupný produkt.



[Obr. 10] Pístový kompresor Perfect 4/150

Řada PerfectLine je prakticky totožná jako řada Perfect, nicméně disponuje navíc zesíleným rámem a novým zátěžovým elektromotorem. PerfectLine je vhodný spíše pro střední a menší řemeslníky, kteří s kompresorem často cestují.



[Obr. 11] Pístový kompresor PerfectLine 3.0/100



Motogenerátory ATMOS AT jsou dieselové nebo benzínové záložní nebo trvalé zdroje elektrické energie vhodné zejména pro zemědělství, stavebnictví, průmysl nebo armádu. Proto musí být vysoce odolné vůči výkyvům odběru, změnám teploty, prachu, vodě a blátu.



[Obr. 12] Dieselový generátor AT 60 S/J

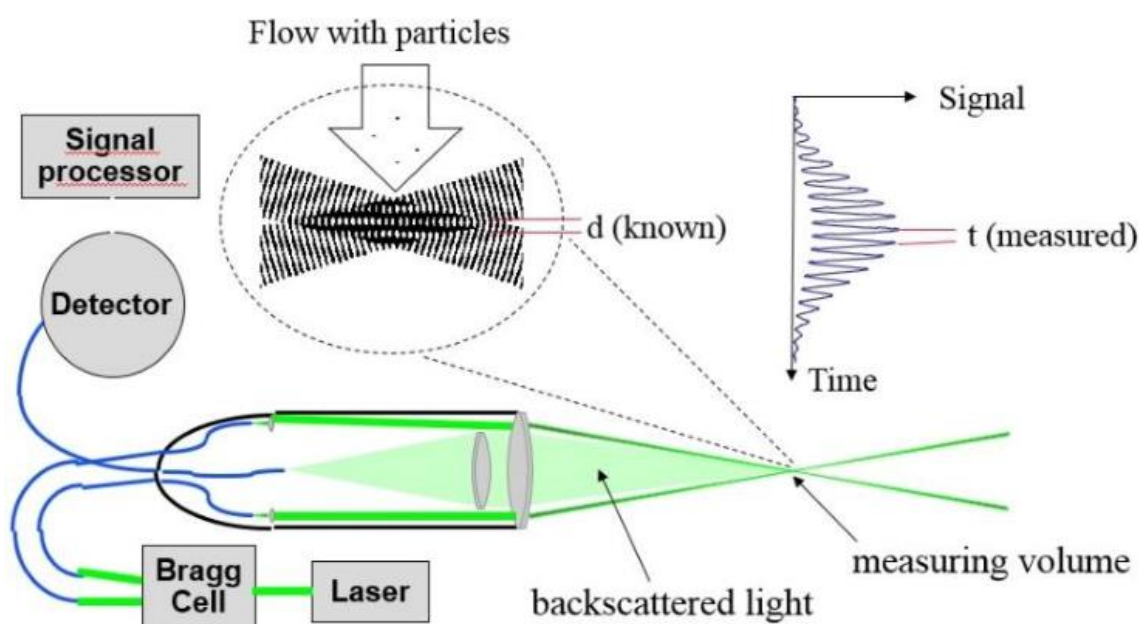
### 3. Popis experimentu

Vzhledem k neustále zpříšňujícím se hlukovým normám se musí modely kompresorů pro evropský trh neustále upravovat. Kompresor je nicméně třeba dostatečně chladit, aby nedošlo k přehřátí kompresoru a následnému defektu, například zadření šroubového bloku nebo bloku motoru kvůli teplotní objemové roztažnosti. Nejjednodušší způsob, jak snížit vibrace a následně díky tomu i hluk, je tlumení karoserie za pomoci tlumicích materiálů, v tomto případě za pomoci samolepicích tlumicích pěnových pásů. Kvůli zvětšení plochy nalepeného tlumicího materiálu se musí zmenšit plocha, kudy kompresor vytlačuje ohřátý vzduch a kompresor se proto hůř chladí. Jako potenciální optimalizace chladicího systému se tedy nabízí přemístění a úprava mřížky na výstupu vzduchu ze skříně kompresoru, aby nedocházelo ke zbytečným turbulencím a zhoršení průtoku vzduchu.

Pro změření rychlostí a následného vyhodnocení charakteristických veličin se nabízí několik metod. První je metoda *obrazového měření rychlosti unášených částic* (angl. Particle Image Velocimetry – PIV), která se hodí skvěle pro zjištění rychlostních vektorů v rovině, nicméně má horší vypovídací hodnotu v konkrétních bodech. Také je nutné zajistit snímáči kameru, která by ovšem musela být přímo nad mřížkou, vyříznutou a nahrazenou například plexisklem. Toto by nicméně ovlivnilo validitu celého experimentu, jelikož by šlo o odlišnou geometrii. Druhá možnost je metoda *žhaveného drátku* (angl. Hot Wire Anemometry – HWA). HWA má přesné a rychlé výsledky, nicméně je obtížná příprava vnitřního traverzéro, jehož přítomnost by mohla ovlivnit validitu výsledků. Rovněž se jedná o metodu citlivou na čistotu proudícího média, jelikož se drátek může velice rychle a snadno poškodit. Třetí metoda, která připadá v úvahu, je metoda tlaková (Pressure Tube Anemometry – PTA). Toto by byla optimální metoda, pokud by nám nevadilo, že se za sondou tvoří druhotné víry a ovlivňují celé měření. Výhodou této metody je především její jednoduchost a robustnost ve srovnání s ostatními běžnými metodami měření rychlosti proudění. Avšak pro smysluplnou interpretaci naměřených tlaků vyžaduje, aby proudění bylo jednorozměrné a jednosměrné. Navíc vyžaduje opatrný přístup ke středování fluktujícího signálu. Poslední a pro tento experiment zvolená metoda je metoda Laserové Dopplerovské Anemometrie – LDA. Tuto metodu považuji za optimální pro tento experiment, protože není třeba upravit geometrii skříně kompresoru, pouze se vyřízne a nahradí plexisklem kus plechu pro optický přístup. Také není proudění ve skříně ničím ovlivněno, protože tato metoda pracuje s laserem. Největší výhodou má ale v tom, že jako jediná z těchto metod dokáže měřit jak kladnou, tak zápornou složku rychlosti, byť jen v jednom směru. Vliv stopovacích částic na změnu proudění můžeme zanedbat.

### 3.1. Princip metody LDA

Metoda LDA pracuje na základě Dopplerova principu. Světelný paprsek o určité vlnové délce vychází z laseru. V momentě, kdy dojde k přechodu laseru přes pohybující se částici média, paprsek změní svou vlnovou délku. Tuto změnu zaznamená přijímací zařízení a vyhodnotí ji. Podmínkou metody je, že použitý světelný paprsek musí být koherentní. To znamená, že má konstantní amplitudu, frekvenci a fázový posun. Pokud by světelný paprsek nebyl koherentní, nebylo by možné zaznamenat odchylky od vyzařované frekvence.



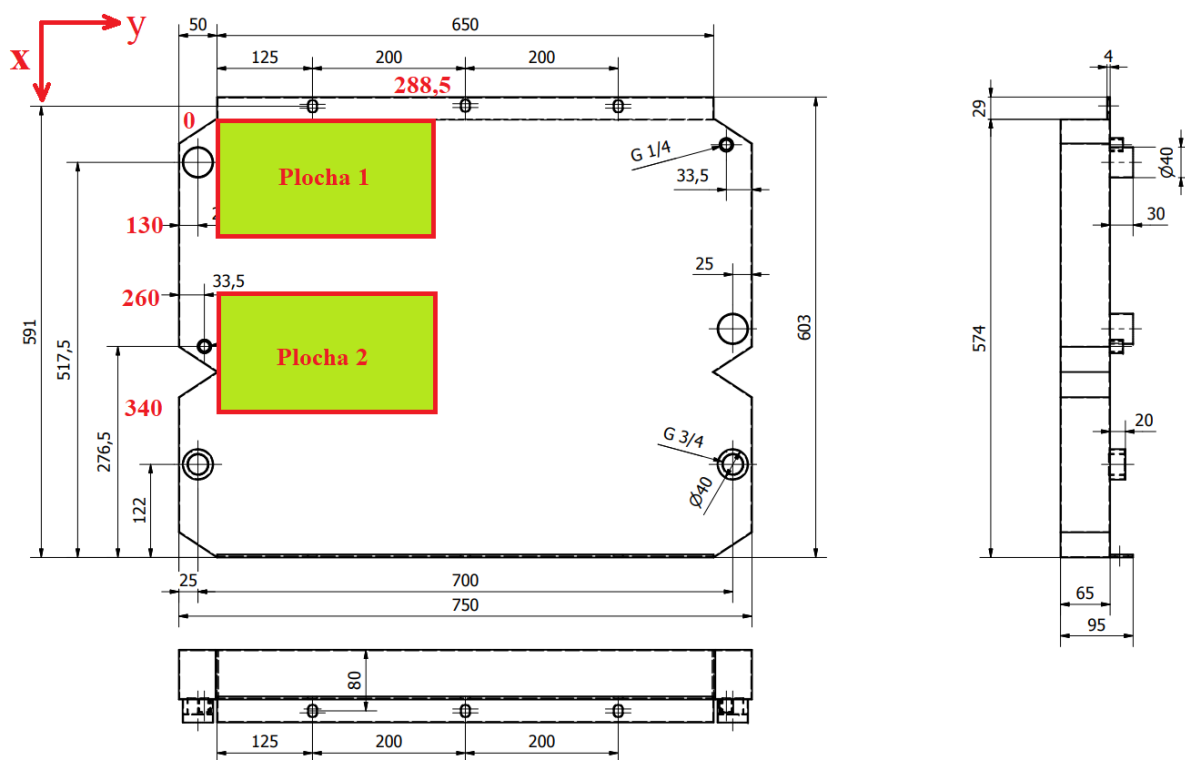
[Obr. 13] *Názorné schéma Laserové Dopplerovské Anemometrie, interferenčního bodu a signálové charakteristiky procházejících částic*

### 3.2. Kompresor PDP-28

Kompresor, ve kterém budeme tento experiment měřit, nese označení PDP – 28. Jedná se o pojízdný, dieselový kompresor s motorem Perkins 404D – 22 o výkonu 35,7 kW, hmotnosti 1000 kg, otáčkách motoru 1500 ot/min při volnoběhu a 2400 ot/min při plném výkonu. V závislosti na otáčkách motoru se pohybuje výkon kompresoru mezi 2,7 – 4,4 m<sup>3</sup>/min. Výkon motoru a tedy i otáčky se regulují tlakovým mechanickým čidlem, které vpouští do motoru více paliva v závislosti na aktuálním tlaku vzduchu v tlakové nádobě.

### 3.3. Sledované oblasti

Vzhledem k rozsahu LDA a použité čočce byly zvoleny 2 sledované oblasti – plocha 1 a plocha 2. Obě plochy byly měřeny 38 mm za chladičem ve směru kolmém na plochu chladiče. Počátek byl zvolen v levém horním rohu chladiče. První plocha byla zvolena v souřadnici  $y$  od 0 do 288,5 mm a v souřadnici  $x$  od 0 do 130 mm. Druhá plocha byla zvolena v souřadnici  $y$  od 0 do 288,5 mm a v souřadnici  $x$  od 260 do 340 mm. Mezera mezi těmito dvěma plochami byla zapříčiněna přítomností rámu, který nebylo možno odstranit bez značného vlivu na validitu experimentu.



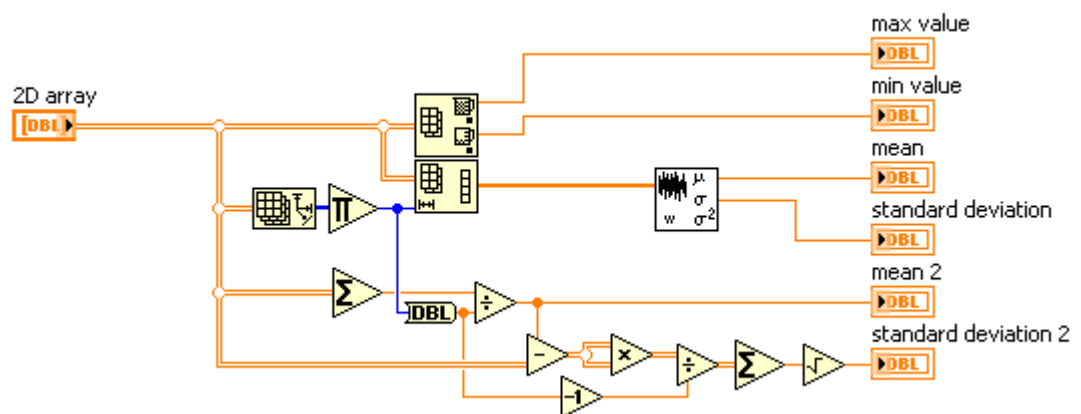
[Obr. 14] Výkres chladiče s vyznačenými sledovanými oblastmi, vzduch proudí v prvním přiblížení kolmo k vyznačeným plochám

### 3.4. Zpracování dat

Veškerá data byla ukládána do textových dokumentů označených podle souřadnice  $y$ , tedy  $y = 0, 10, 20, \dots 288,5$ . Tyto textové soubory byly rozřizeny do složek podle souřadnice  $x$ , tedy  $x = 0, 10, \dots 340$ . U každého bodu byly zaznamenány rychlosti, čas, kdy byly naměřeny a prodleva mezi jednotlivými vzorky.

Data byla následně zpracována v programu LabVIEW, kde byl vytvořen program, který podle čísla složky a čísla textového souboru počítal požadované hodnoty vyšších statistických momentů v daných bodech (např. střední rychlost, intenzitu turbulence atd.) a automaticky exportoval tyto výsledky do trojrozměrných map, na základě kterých je možné vyhodnocovat chování proudění v dané ploše (plocha 1, plocha 2).

Na obrázku [15] můžete vidět jednoduché vlákno z programu LabVIEW pro výpočet maximální hodnoty, minimální hodnoty, střední hodnoty a směrodatné odchylky.



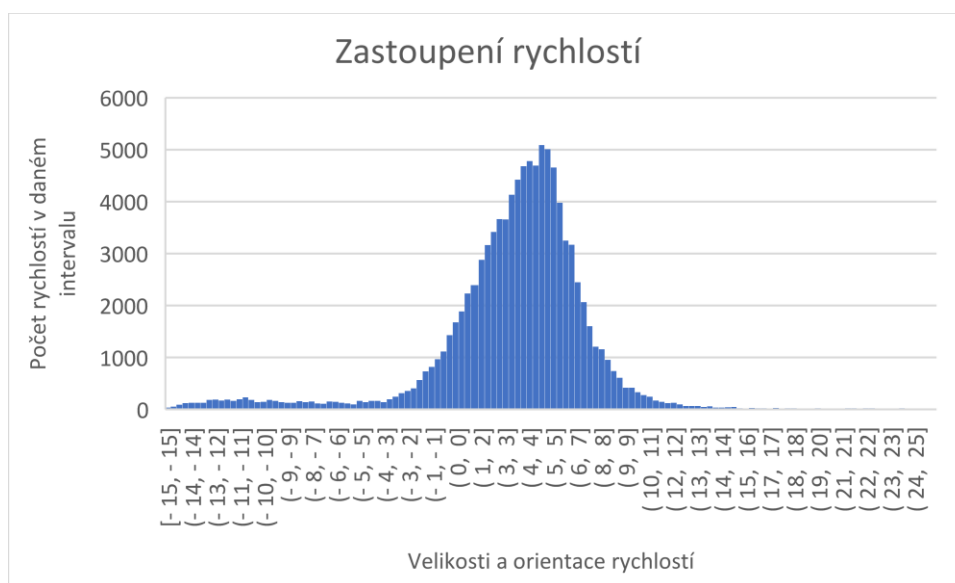
[Obr. 15] Schéma jednoduchého výpočetního vlákna v programu LabVIEW

## 4. Příprava experimentu

### 4.1. Kalibrace LDA a nastavení BSA Flow

Jelikož LDA od Dantec Systems, které bylo pro tento experiment použito, nebylo dlouho využito, bylo potřeba zjistit, zda jsou výsledky přesné a zda je přístroj korektně nakalibrován. Tomuto experimentu předcházelo půl roku zkoušení LDA na experimentálním aerodynamickém tunelu v laboratořích energetiky na Západočeské univerzitě. Bohužel po půl roce ladění programu i podmínek pořád nebyl dostatečný tok dat, který se místo požadovaných desítek kHz pohyboval v desítkách Hz. Bylo tedy nutné zaslat přístroj do Dánska, kde na něm byl proveden servis a kalibrace. Po této proceduře už byl datový tok dostatečný a mohlo se tedy přistoupit k doladění podmínek v programu BSA Flow.

Na obrázku [16] můžete vidět, jak vypadá histogram, pokud je vhodně upravená citlivost, očekávaná rychlost a rychlostní rozptyl.



[Obr. 16] Histogram s korektně nastavenou citlivostí a rozsahem z programu BSA Flow

Vzhledem k tomu, že byla použita jiná čočka než doposud, bylo nutné nastavit i jinou ohniskovou vzdálenost v programu z 380 mm na 500 mm.

## 4.2. Úprava kompresorové skříně a kompresoru

Pro umožnění měření bylo nutné zajistit optický přístup pro laser tak, aby nedošlo k lámání nebo odrazu paprsku. Ve skříně byly vyříznuty dvě obdélníkové díry a nahrazeny plexisklem. Pro zajištění neměnnosti proudění bylo nutné prostor mezi plexisklem a karoserií utěsnit silikonem. Vzhledem k velkým vibracím bylo plexisklo upevněno šrouby M2, aby bylo co nejméně ovlivněno proudění uvnitř kompresoru.

Bylo také nutné upravit ovládání kompresoru, aby tlakový senzor nespínal kvůli maximálnímu tlaku v tlakové nádobě a kompresor mohl být provozován na maximální provozní otáčky a výkon bez nutnosti odběru vzduchu či upouštění stlačeného vzduchu přes tlumič.



[Obr. 17] Optický přístup skrze skřín kompresoru

### 4.3. Nastavení a kalibrace 3D traverzéro

Pro zajištění přesného posouvání interferenčního bodu LDA bylo potřeba nakalibrovat a zajistit pevnou pozici trojrozměrného traverzéro vzhledem k poloze chladiče. Traverzéro byl vyrovnán do vodorovné polohy, kolmo na plochu chladiče a následně ovládán za pomoci speciálního programu z počítače. Nulové souřadnice byly nastaveny na levý horní roh chladiče, souřadnice měřených bodů byly zadávány v přírůstcích. Pro ovládání pohonu traverzéro byl použit program od výrobce, který byl následně na univerzitě upraven v programu LabVIEW docentem Vitaliem Yanovychem.



[Obr. 18] *Pojízdný 3D traverzéro*



[Obr. 19] *Zaaretovaný traverzéro s LDA*



[Obr. 20] *Přípevnění LDA k traverzéro*



#### 4.4. Zajištění sycení stopovacími částicemi

Pro zajištění optimálního datového toku (data rate) bylo nutné obohatit proudící tekutinu o stopovací částice. Přesnost měření velmi úzce souvisí s vhodným výběrem druhu stopovací částice. Pokud je částice moc velká, není dostatečný datový tok a špatně reaguje na změnu směru proudu. Pro generování stopovacích částic byl využit atomizér SAFEX Fog Generator 2010 (220 VAC) od společnosti SAFEX.

Během kalibrace LDA byly vyzkoušeny dvě kapaliny, SAFEX Blitz Reflex a SAFEX Extra Clean. Při použití SAFEX Blitz Reflex nebylo dosaženo dostatečně vysokého datového toku a bylo nutné použít SAFEX Extra Clean, tedy kapalinu používanou pro medicínské přístroje. Zde jsme již byli s kvalitou signálu spokojeni, ale cena této kapaliny byla pětinásobná.



[Obr. 21] Generátor částic SAFEX Fog Generator 2010 (220 VAC), fotografie převzatá ze stránek výrobce.

## **5. Průběh experimentu**

### **5.1. Stanovení kroku a počtu vzorků**

Pokud bychom zvolili moc hrubý krok, nedostali bychom vypovídající výsledky. V případě zvolení moc jemné mřížky by výsledky byly mnohem lepší, nicméně by experiment trval několikanásobně déle. V tomto případě byl zvolen krok 10 mm, což znamenalo 667 bodů, které bylo nutné změřit. Pokud bychom zvolili krok 5 mm, museli bychom změřit 2668 bodů.

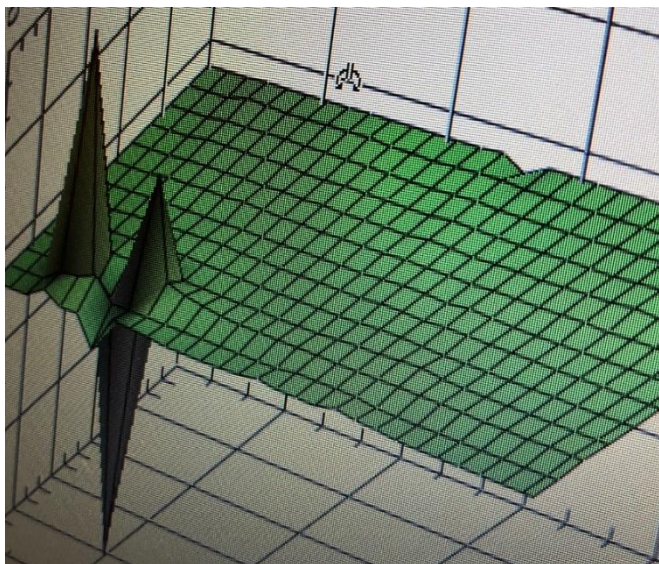
Počet vzorků byl zpočátku stanoven na 100 000 vzorků na prostorový měřicí bod.

### **5.2. Úprava počtu vzorků**

Po odměření prvních 145 bodů bylo zjištěno, že 100 000 vzorků je časově (a finančně) příliš náročné. Tyto body byly tedy vyhodnoceny a přeměřeny po 10 000 vzorcích. Výsledky byly prakticky stejné, histogramy téměř totožně vyhlazené. Celý experiment byl tedy dokončen s 10 000 vzorky v každém bodě.

### 5.3. Zjištění chyb v měření

V programu LabVIEW bylo využito funkce pro zjištění anomálií v datech. Bylo zjištěno, že v první ploše (viz obrázek [22]) bylo 5 chybně změřených bodů, v druhé 1 bod a jedna celá řada, tj. celkově 35 bodů. Chyby v měření byly pravděpodobně zapříčiněny špatným chodem nebo nastavením atomizéru. Jelikož byla chybná data nahrazena správnými, nebylo možné tuto funkci zopakovat a byl použit obrázek vyfocený telefonem během probíhajícího měření.



[Obr. 22] Anomálie v okně č. 1

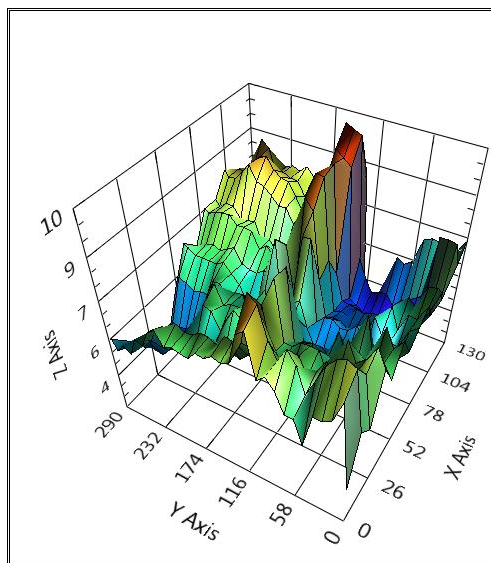
### 5.4. Přeměření chybných bodů

Vzhledem k použití trojrozměrného travrzéru bylo snadné najet do požadované pozice a chybné body přeměřit. Po přeměření byla opět spuštěna funkce na odhalení chybného měření. Žádné opětovné měření nebylo chybné.

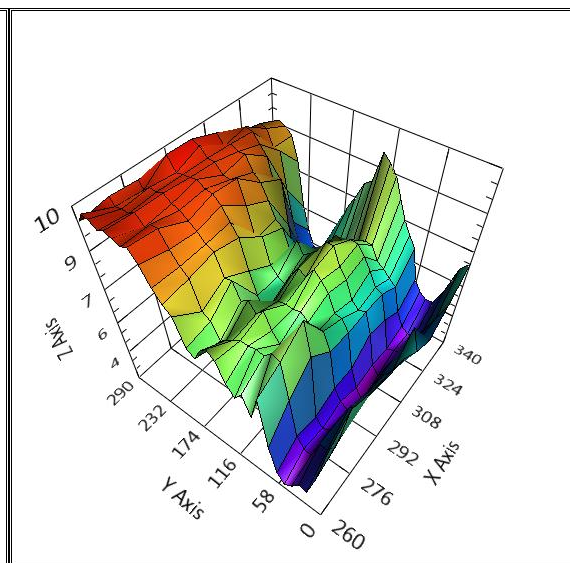
## 6. Charakteristické veličiny

### 6.1. Střední rychlost

Jelikož okamžitá rychlost částice, jež se pohybuje neuspořádaným náhodným pohybem, je veličina, která je náhodná a neustále se v průběhu času mění, je to pro charakterizaci proudění naprosto nevypovídající hodnota. Bylo tedy nutné vypočítat střední rychlost (pozn. anglicky mean velocity), která je definována jako hodnota střední rychlosti částic a je určena pomocí časového průměru tekutiny ve fixním bodě, tj. integrálem rychlosti v libovolném časovém intervalu  $T$  od počáteční hodnoty  $t_0$ .



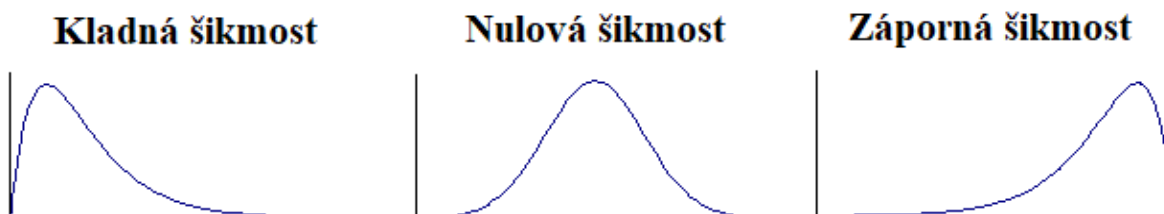
[Obr. 23] *Prostorové rozložení střední rychlosti v okně č. 1*



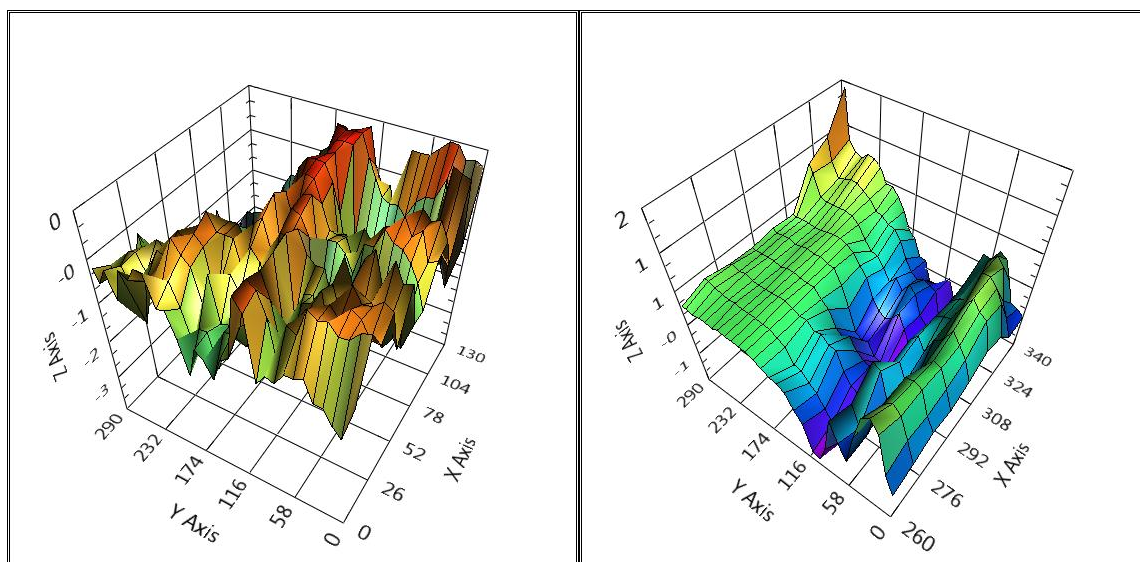
[Obr. 24] *Prostorové rozložení střední rychlosti v okně č. 2*

## 6.2. Šikmost

Koeficient šikmosti (pozn. anglicky skewness factor) je charakteristika, která popisuje asymetrii náhodné veličiny. Na obrázku [25] můžete vidět, jak vypadá histogram s kladnou, nulovou a zápornou šikmostí.



[Obr. 25] Názorné vyobrazení průběhu histogramů pro danou šikmost

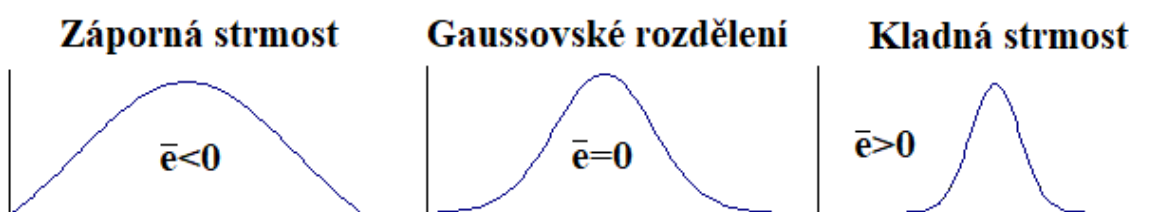


[Obr. 26] Prostorové rozložení  
šikmosti v okně č. 1

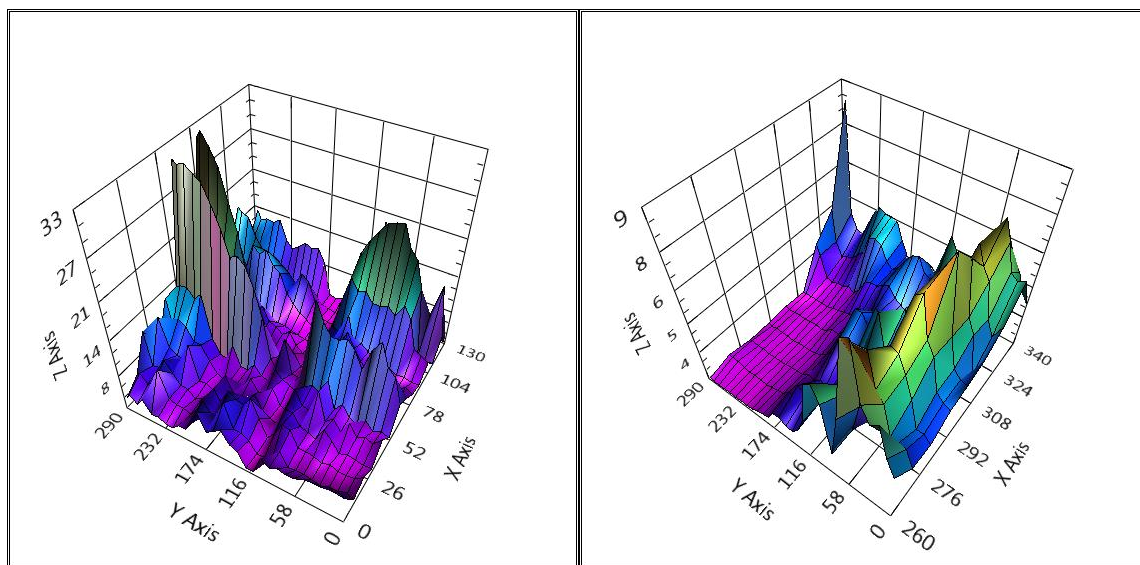
[Obr. 27] Prostorové rozložení  
šikmosti v okně č. 2

### 6.3. Špičatost

Koeficient špičatosti neboli strmosti (pozn. anglicky flatness nebo kurtosis factor) je charakteristika, která porovnává rozdělení náhodné veličiny s Gaussovským rozdělením. Normální rozdělení, tedy rovnoměrné, má strmost rovnou nule. Pokud je strmost kladná, leží většina hodnot náhodné veličiny poblíž střední hodnoty, a tudíž je křivka strmější. V případě záporné strmosti je rozložení rovnoměrnější a křivka plošší než u Gaussovského rozdělení. Gaussovské rozdělení nabývá hodnoty 3. Ve většině výpočtů je tato hodnota odečítána. V trojrozměrných grafech, které jsou níže, není odečtena tato hodnota, proto začínají na hodnotě 3. Na obrázku [28] můžete názorně vidět, jak vypadají křivky s danou strmostí.



[Obr. 28] Názorné vyobrazení histogramů pro různé strmosti po odečtení hodnoty 3

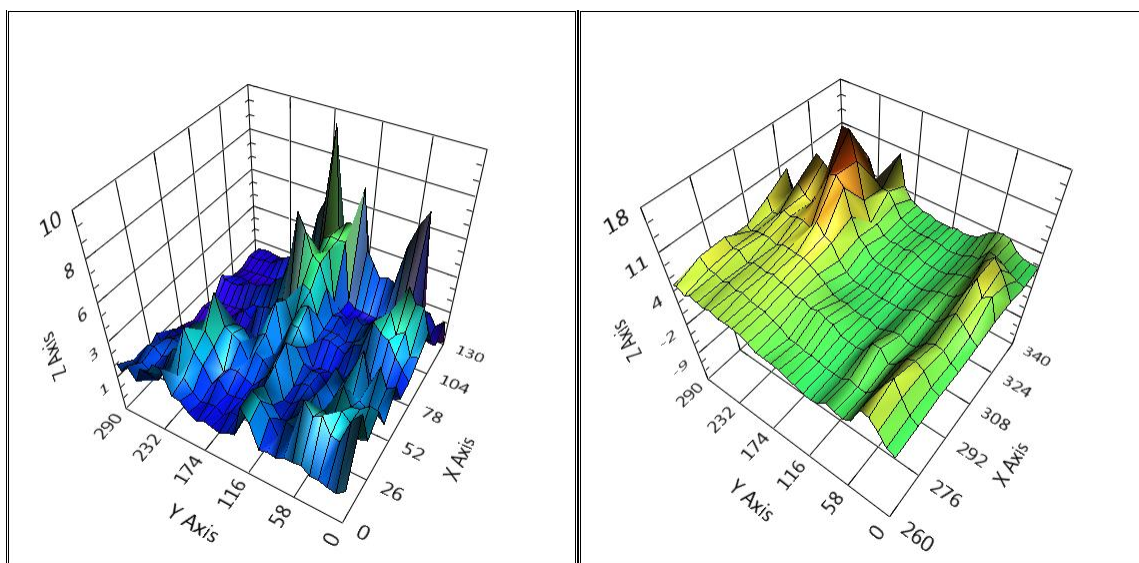


[Obr. 29] Prostorové rozložení  
strmosti v okně č. 1

[Obr. 30] Prostorové rozložení  
strmosti v okně č. 2

## 6.4. Intenzita fluktuací podélné složky rychlosti

Intenzita fluktuací podélné složky rychlosti (pozn. anglicky intensity of streamwise velocity fluctuations) je definována jako poměr směrodatné odchylky fluktuace rychlosti proudění ve směru střední rychlosti ke střední rychlosti v tomto směru a představuje intenzitu fluktuace rychlosti proudění. Tato statistická veličina ukazuje stupeň turbulence proudění vzduchu v daném směru a pokud je někde nulová střední rychlost, což v tomto případě nikde nebyla, může se limitně blížit až k nekonečnu.

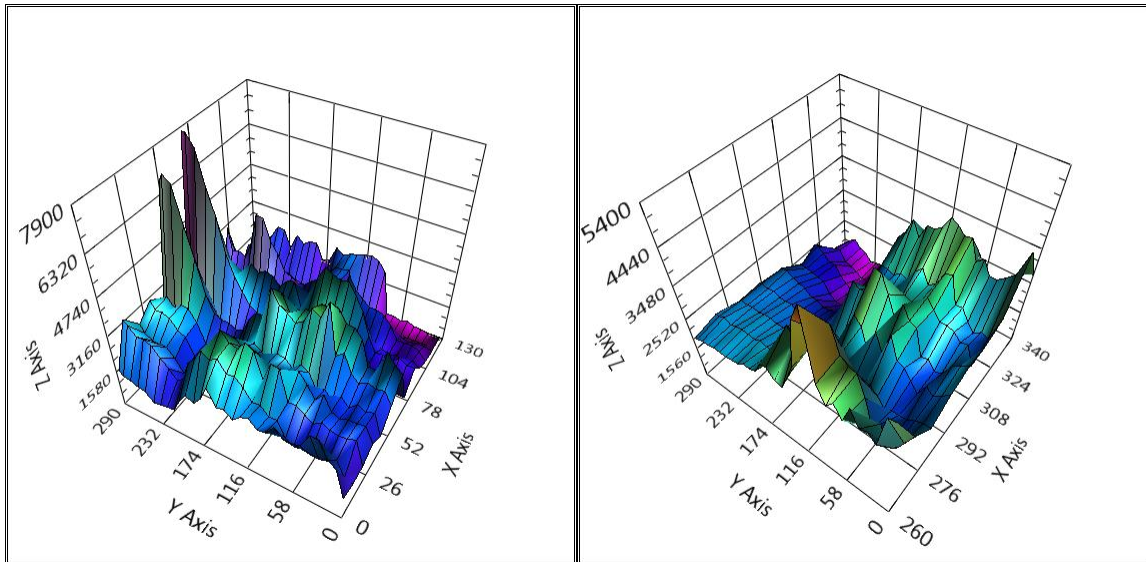


**[Obr. 31]** *Prostorové rozložení intenzity fluktuace podélné složky rychlosti v okně č. 1*

**[Obr. 32]** *Prostorové rozložení intenzity fluktuace podélné složky rychlosti v okně č. 2*

## 6.5. Průměrná frekvence vzorkování

Na obrázcích [33] a [34] můžete vidět průměrnou frekvenci vzorkování (pozn. anglicky data rate). Čím vyšší číslo, tím vyšší frekvence a menší celkový čas sběru dat. Frekvence vzorkování je úzce závislá na vhodné volbě typu stopovacích částic. Také lze uvažovat, že vyšší frekvence vzorků znamená větší hmotnostní průtok přes chladič a tím pádem lepší odvod tepla.



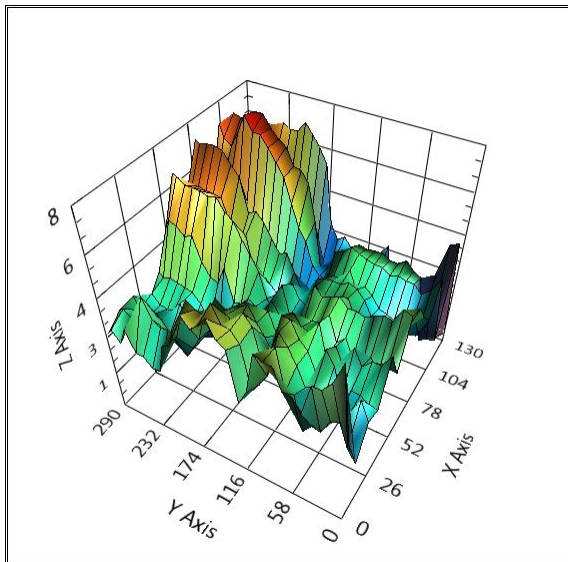
[Obr. 33] *Prostorové rozložení  
průměrné frekvence vzorkování  
v okně č. 1*

[Obr. 34] *Prostorové rozložení  
průměrné frekvence vzorkování  
v okně č. 2*

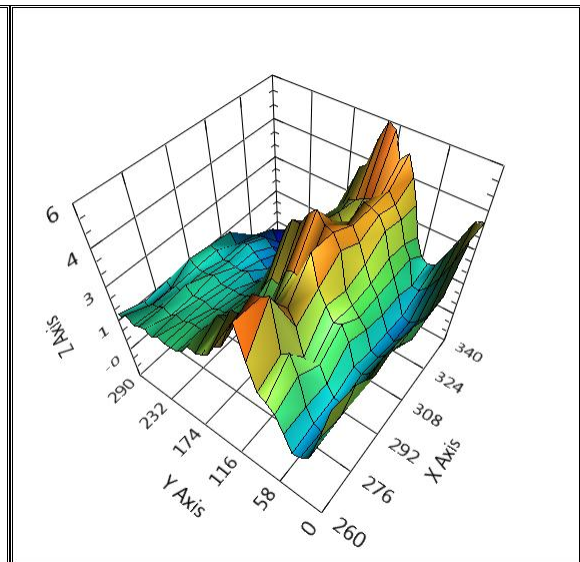


## 6.6. Průměrná rychlost

Průměrná rychlost (pozn. anglicky average speed) v čase v každém bodě v obou oknech kopíruje rozložení sahary oproti chladiči. V prvním i druhém okně lze jasně vidět, že průměrná rychlost je nejvyšší po jejím obvodu. Vzhledem k velkému počtu záporných rychlostí okolo vnějšího okraje sahary a za jejím okrajem směrem ke středu vidíme velký propad průměrné rychlosti.



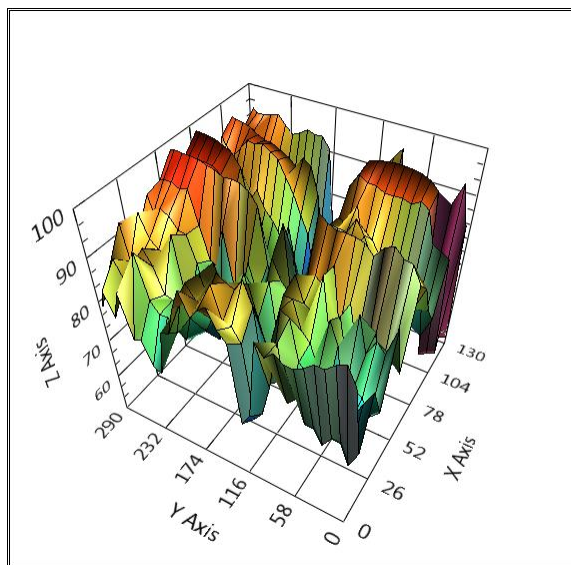
[Obr. 35] *Prostorové rozložení průměrné rychlosti v okně č. 1*



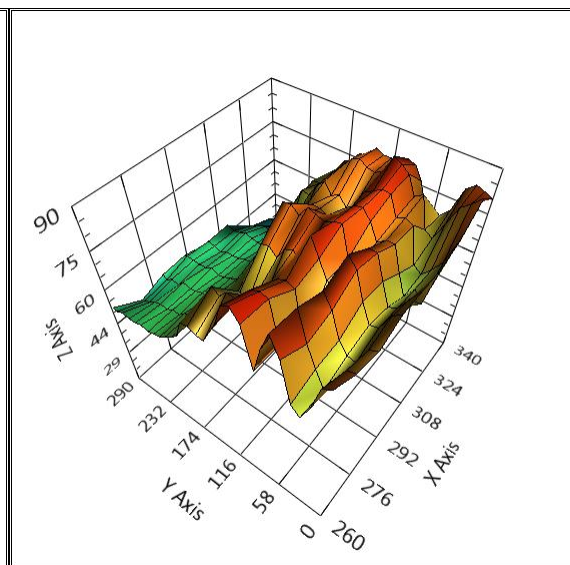
[Obr. 36] *Prostorové rozložení průměrné rychlosti v okně č. 2*

## 6.7. Zastoupení kladných a záporných rychlostí

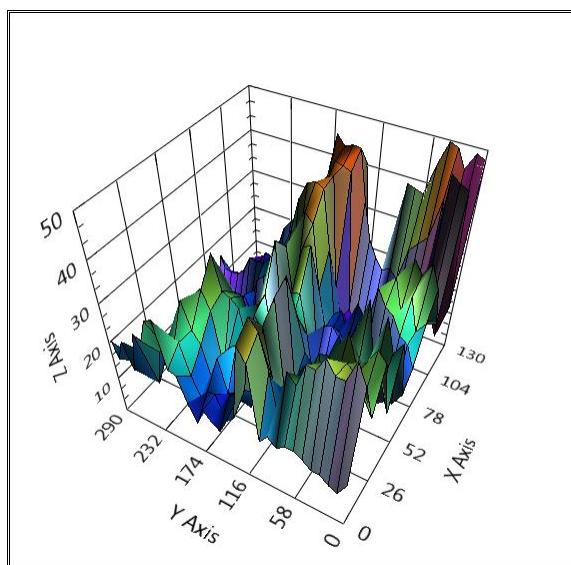
Na obrázcích [37] a [38] můžete vidět zastoupení kladných rychlostí v první a druhé sledované oblasti. Obrázky [39] a [40] ukazují, kde je velké zastoupení záporných rychlostí, a tudíž zde můžeme předpokládat vysokou intenzitu turbulence. Vzhledem k velkému množství záporných rychlostí jsme se ujistili, že jsme zvolili vhodnou metodu, protože za pomoci metod HWA a PTA nelze měřit záporné složky rychlosti.



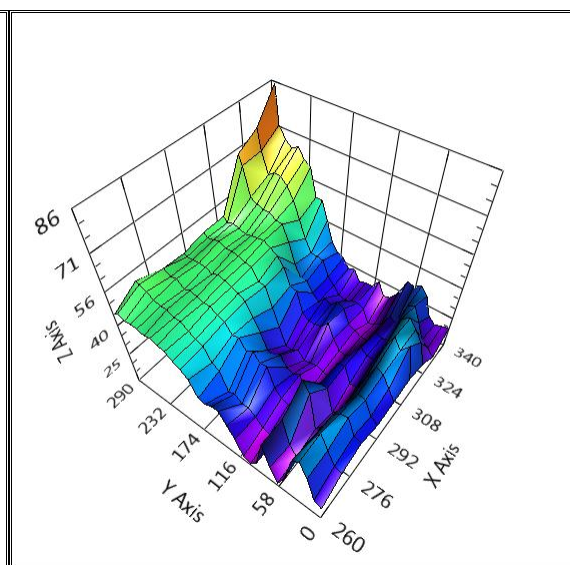
[Obr. 37] *Prostorové rozložení  
kladných rychlostí v okně č. 1*



[Obr. 38] *Prostorové rozložení  
kladných rychlostí v okně č. 2*



[Obr. 39] *Prostorové rozložení  
záporných rychlostí v okně č. 1*

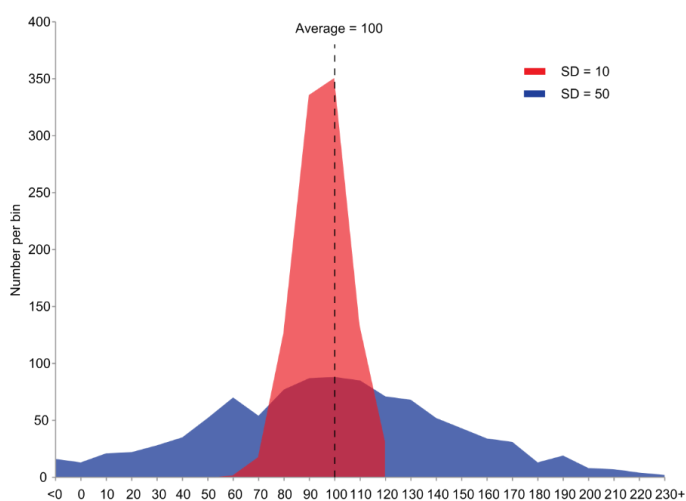


[Obr. 40] *Prostorové rozložení  
záporných rychlostí v okně č. 2*

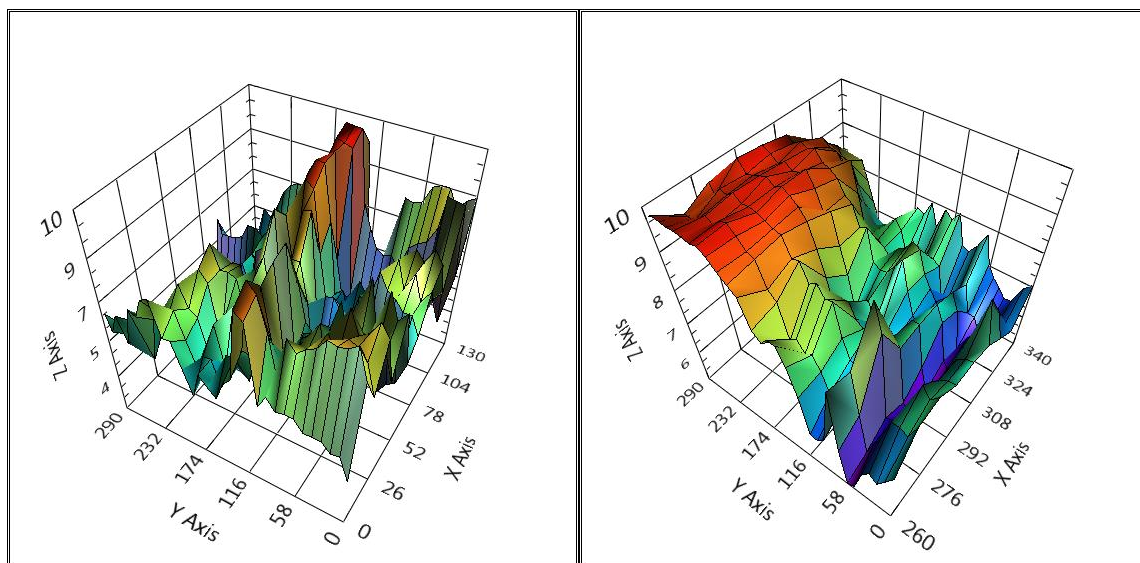
## 6.8. Směrodatná odchylka

Směrodatnou odchylkou (pozn. anglicky standard deviation) se ve statistice rozumí míra statistické variability. V tomto případě vypovídá o tom, nakolik se od sebe liší jednotlivé rychlosti v souboru zkoumaných rychlostí. Pokud je směrodatná odchylka malá, jsou si jednotlivé rychlosti v souboru z větší části navzájem podobné. Čím vyšší odchylka, tím větší jsou vzájemné odlišnosti.

Na obrázku [41] lze vidět, jak je směrodatná odchylka důležitá. Průměr hodnot je u obou souborů 100, ale u červeného souboru nabývá směrodatná odchylka hodnoty 10, zatímco u modrého nabývá hodnoty 50.



[Obr. 41] Hodnota směrodatné odchylky pro dva soubory o stejné hodnotě

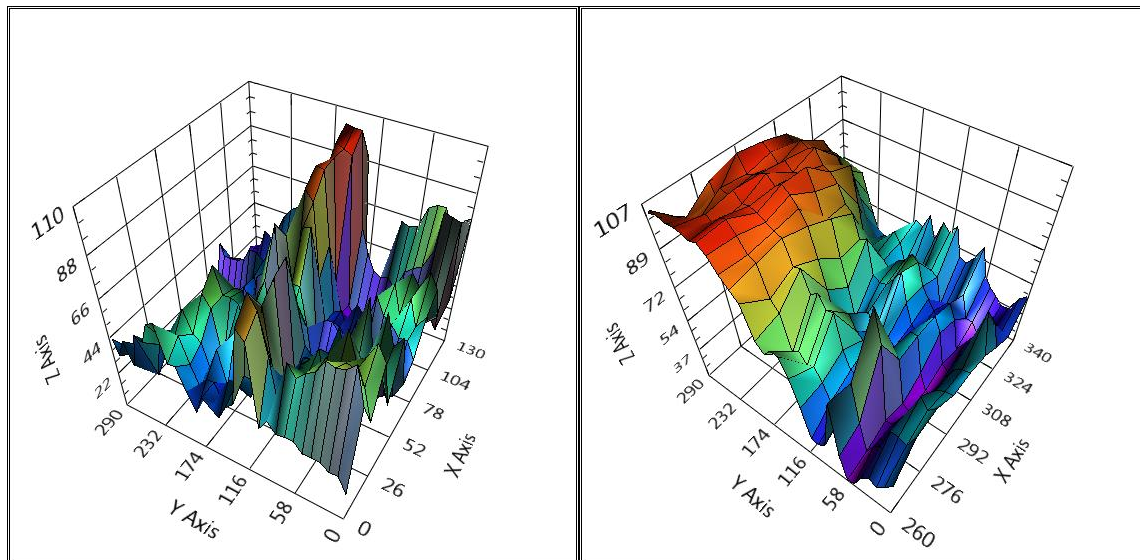


[Obr. 42] Prostorové rozložení  
směrodatné odchylky v okně č. 1

[Obr. 43] Prostorové rozložení  
směrodatné odchylky v okně č. 2

## 6.9. Variance

Variance neboli rozptyl je druhý centrální moment náhodné veličiny. Tato charakteristika vyjadřuje variabilitu rozdělení daného souboru náhodných hodnot kolem její střední hodnoty.

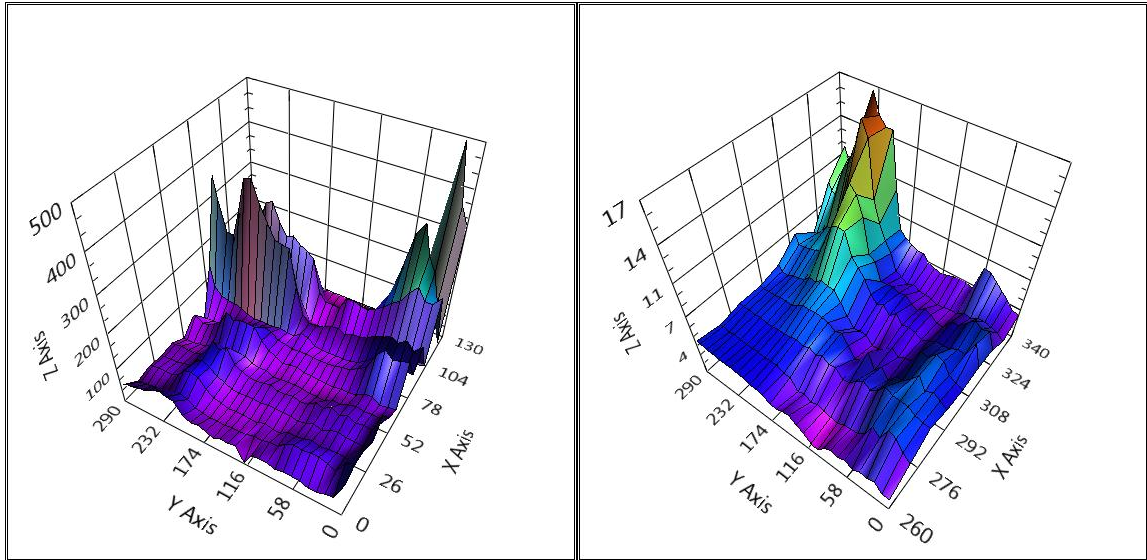


[Obr. 44] *Prostorové rozložení  
variance v okně č. 1*

[Obr. 45] *Prostorové rozložení  
variance v okně č. 1*

## 6.10. Celkový čas

Na obrázcích [46] a [47] lze vidět celkový čas nutný pro změření daného množství vzorků. V prvním okně byly časy bodů s 10 000 vzorky upraveny poměrně na 100 000 vzorků.

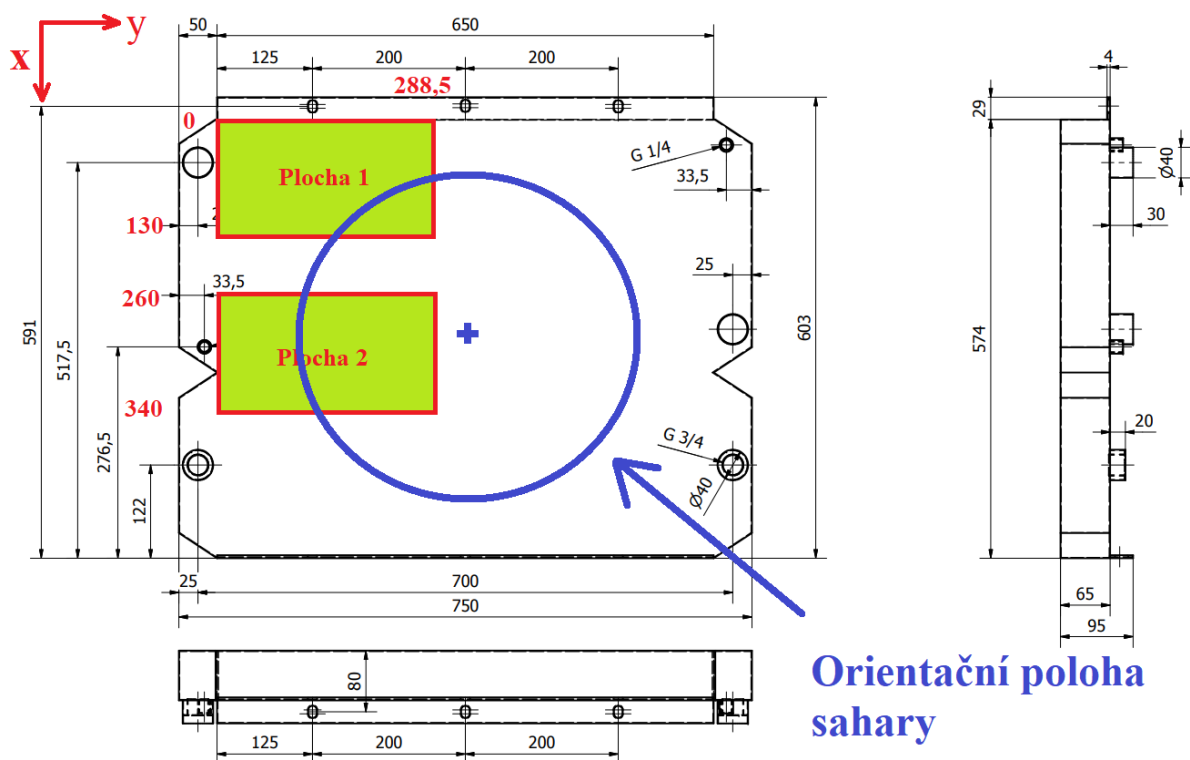


[Obr. 46] *Prostorové rozložení celkového času v okně č. 1*

[Obr. 47] *Prostorové rozložení celkového času v okně č. 1*

## 7. Charakteristika proudění

Pro bližší pohled na jednotlivé oblasti byly zvoleny 3 vzájemně vzdálené a rozdílné body. První bod byl zvolen v rohu chladiče o souřadnicích  $x = 10$ ,  $y = 10$ , druhý bod byl zvolen na obvodu vrtule o souřadnicích  $x = 280$ ,  $y = 130$  a třetí bod byl zvolen poblíž středu chladiče a sahary o souřadnicích  $x = 340$ ,  $y = 285$ .

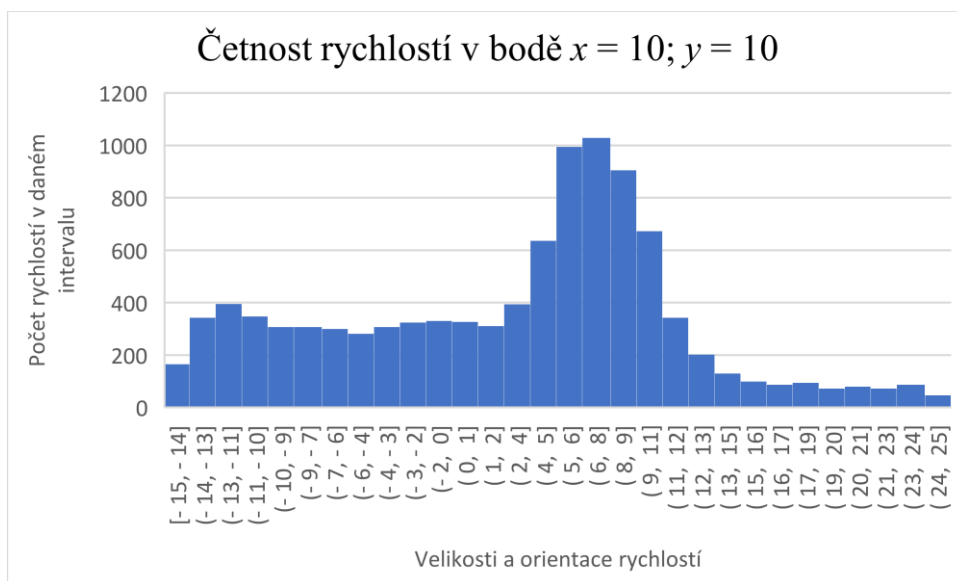


[Obr. 48] Výkres s vyznačenými sledovanými plochami a orientační polohou sahary

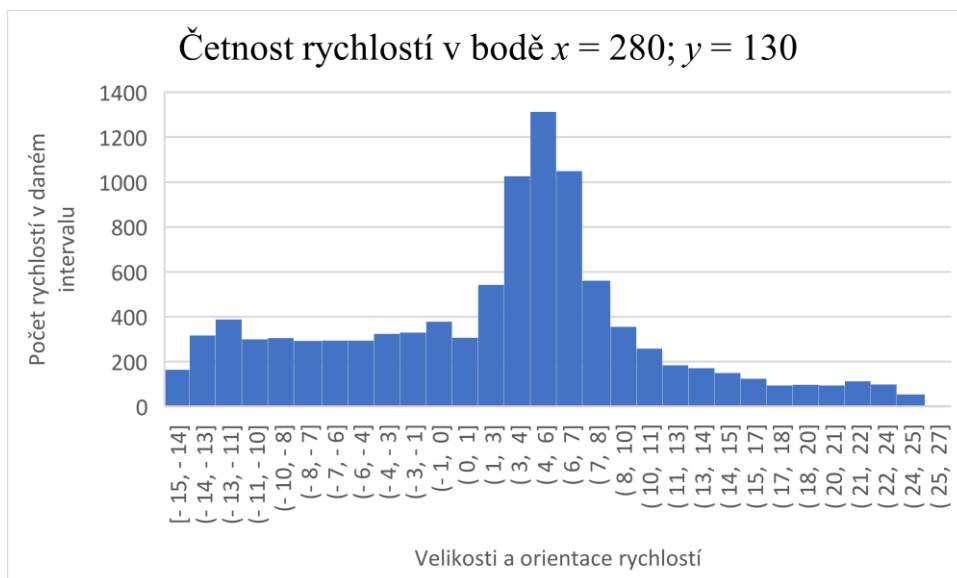
Na obrázku [49] můžeme vidět histogram prvního bodu. Zastoupeny jsou zde jak záporné, tak kladné rychlosti. Největší zastoupení zde mají rychlosti 4 m/s až 11 m/s a to konkrétně 4711 rychlostí. Jelikož je zde převaha kladných rychlostí a nízká intenzita turbulence, můžeme tedy předpokládat, že je zde především kladný hmotnostní tok a zpětné proudění je zapříčiněno vracejícími se víry od geometrie skříně.

Histogram druhého bodu je znázorněn na obrázku [50]. Zde je patrné, že na obvodu vrtule je mnohem méně záporných rychlostí a převažují zde kladné rychlosti. Strmost je zde vysoká a intenzita turbulence prakticky konstantní po celém obvodu. Z těchto důvodů zde lze předpokládat velmi nízký počet turbulencí a konstantní, kladný hmotnostní tok.

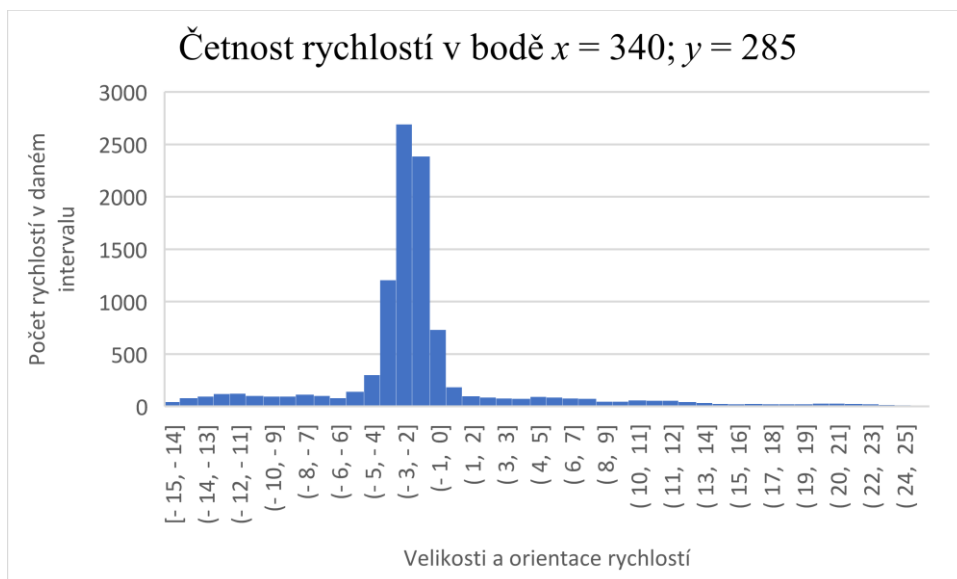
Poslední bod, který byl zvolen pro bližší popis, je možné vidět na obrázku [51]. Jedná se o bod v rohu druhé plochy směrem ke středu sahary. Zde je na první pohled patrné, že je zde velice vysoká intenzita turbulence a zastoupení kladných rychlostí je zde naprosto minimální, zhruba 14 %. Vysoká strmost, střední rychlost a průměrná rychlost ukazuje, že zde není prakticky žádný kladný tok a průtok chladičem lze tedy předpokládat taktéž z většiny záporný až nulový. Chladič zde tedy pravděpodobně dobře vyzáruje tepelnou energii díky turbulencím, ale není zde tok vzduchu, který by danou tepelnou energii vyzářenou do okolního prostředí odnesl pryč do požadovaného směru, tedy výstupní mřížky.



[Obr. 49] Histogram rychlostí v bodě č. 1



[Obr. 50] Histogram rychlostí v bodě č. 2



[Obr. 51] Histogram rychlostí v bodě č. 3

## 7.1. Vyhodnocení dat jako celku

Po prostudování jednotlivých grafů a histogramů lze popsat část jevů, které se za chladičem dějí. Od rohu chladiče můžeme vidět, jak rychlost klesá a intenzita turbulence se zvyšuje až do turbulentní zóny. Tato zóna se nachází vně i uvnitř po obvodu sahary, je zde velmi nízká průměrná rychlost a vysoká intenzita turbulence. Po obvodu sahary lze předpokládat velký a kladný hmotnostní tok vzhledem k téměř konstantní turbulenci a vysoké průměrné i střední rychlosti. Tato oblast je pro chlazení nejdůležitější, protože zde dochází k velmi dobrému odvádění tepelné energie. Od obvodu sahary směrem ke středu se průměrná a střední rychlost snižuje, intenzita turbulence se markantně zvyšuje. Čím více se blížíme ke středu sahary, tím větší množství záporných rychlostí se v souboru vyskytuje. V bodu, který je nejbližší středu sahary je zaokrouhleně 86 % rychlostí záporných a dá se předpokládat, že na středu sahary je průměrná rychlost prakticky nulová a tím pádem je efektivita chlazení taktéž téměř nulová.

Cílem této bakalářské práce bylo i spočítat a následně vykreslit frekvenční spektra v důležitých bodech. To vzhledem k povaze dat a vlastnostem programu nebylo možné.



## 8. Závěr

Bylo provedeno experimentální měření proudění vzduchu uvnitř skříně šroubového kompresoru. K tomuto měření bylo využito metody LDA a programu BSA Flow od firmy Dantec Dynamics GmbH.

Byla upravena skříň kompresoru a ovládání kompresoru pro optimální přístup pro optickou metodu a možnost měření při plném výkonu.

Data byla vyhodnocena pomocí programů BSA Flow a LabVIEW, které byly upraveny tak, aby bylo možné co nejrychleji vyhodnocovat naměřené soubory dat. Dané výsledky byly následně interpretovány jak jednotlivě, tak jako celek. Z tohoto celku byly vybrány 3 body, které byly důkladněji vyhodnoceny a popsány. Vzhledem k časově omezenému experimentu bylo nutné zvolit pouze jednu metodu pro popis proudění. Pro následující aplikace by bylo pro lepší představu o proudění vhodné například proměřit svislou složku rychlosti či použít metodiku PIV, díky které by bylo možné změřit velikosti a směry rychlostních vektorů najednou v celém poli. Tím by se získal lepší přehled o konkrétních vírech, ale by bylo ovšem nutné použít v závislosti na této metodě i metodu LDA, neboť metoda PIV není schopná mapovat konkrétní časový vývoj.

Jako nejjednodušší a nejlevnější varianta pro zlepšení chladicího okruhu se jeví úprava geometrie kompresorové skříně, konkrétně relokace výdechu ze skříně. Pokud by se udělalo několik různých variant skříně šroubového kompresoru, mohly se na místě experimentu velice rychle měnit a zkoumat, jaký vliv má každá daná geometrie na chladicí okruh.

Experiment by bylo vhodné pro důležitější aplikace doplnit například o numerické simulace, kam by se zadaly v tomto experimentu získané okrajové podmínky jako například vstupní a výstupní rychlosti, intenzita turbulence nebo vstupní a výstupní teplota, což by danou numerickou simulaci zpřesnilo.

## 9. Seznam použité literatury

### 9.1. Knižní zdroje

[1] KOPECKÝ, V. *Laserová anemometrie v mechanice tekutin*. Tribun EU, 2008, 205 s., ISBN: 978-80-7399-357-3

[2] TROPEA, Cameron, John F. FOSS, Alexander L. YARIN. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. 2522-8692. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-25141-5

[3] POPE, Stephen B. *Turbulent Flows*. Velká Británie: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780521598866

[4] MALÝ, P. *Optika*. Praha. Karolinum. 2008. ISBN 978-80-246-1342-0

[5] URUBA, Václav. *Turbulence*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2000. ISBN 978-80-01-04330-1.

[6] DANTEC. DYNAMIC STUDIO *Measurement principles of LDA*,  
<https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-lda>

[7] DANTEC DYNAMIC *BSA Flow Software User Guide*. Skovlunde (Dánsko) 2014

[8] DANTEC DYNAMIC *LDA and PDA Reference Manual*. Skovlunde (Dánsko) 2011

[9] DANTEC DYNAMIC *Visual Interlock Box for FlowExplorer Instalation & User's guide*. Skovlunde (Dánsko) 2007

[10] DANTEC DYNAMIC *FlowExplorer Instalation & User's guide*. Skovlunde (Dánsko) 2014

[11] DANTEC DYNAMIC *Liquid Droplet Seeding Generator*. Skovlunde (Dánsko) 2003

### 9.2. Internetové zdroje

[1] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/>

## 10. Citovaná literatura

[1] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/historie>

## 11. Zdroje obrázků

Grafy a fotografie vzniklé při měření a vytvořené autorem této bakalářské práce nejsou zdrojovány.

[1] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/historie>

[2] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-Albert-3-20-kW>

[3] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-SEC-22-37-kW>

[4] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-SMARTRONIC-30-110-kW>

[5] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-PDP-Perkins>

[6] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-PDK-Kubota>

[7] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-PDC-Caterpillar>

[8] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-PB-Vanguard>

[9] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/rada-LOK>

[10] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/perfect>

[11] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/perfectline>

[12] ATMOS Chrást s.r.o. *ATMOS Chrást* [online]. Chrást: ATMOS Chrást, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.atmos-chrast.cz/cz/dieselove-generatory>

[13] SIMSON, R. “INVESTIGATING AIRFLOW PATTERNS NEAR SUPPLY AND EXHAUST VENTS OF ROOMBASED VENTILATION UNIT USING LASER DOPPLER ANEMOMETRY.” *European Scientific Journal*, ESJ 10 (2014)

[21] DANTEC DYNAMICS. *Dantec Dynamics* [online]. DK-2740 Skovlunde, Denmark: Dantec Dynamics, 2010 [cit. 2020-06-28]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/product/safex-fog-generator-2010-220-vac>

[41] Standard deviation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison\\_standard\\_deviations.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparison_standard_deviations.svg)