

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření proudových parametrů lopatkového kola volně se protáčejího
ve výstupním proudu z kontrakční dýzy kalibračního tunelu

Autor: **Vojtěch KAISER**
Vedoucí práce: **prof. Ing. Václav URUBA, CSc.**
Konzultant: **Ing. Kamil Sedlák, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů	1
1. Úvod	2
2. Experimentální tunely	3
2.1 Rozdělení tunelů.....	3
2.2 Návrh tunelu.....	3
3. Hardwarové vybavení a komunikace (řetězec).....	4
4. Měřicí zařízení ve vnitřní části tlakového převodníku	5
5. Tlakové převodníky.....	6
6. Měření tlaku v pohybujících se tekutinách	7
7. Měření teploty v pohybujících se tekutinách	13
8. Popis oběžného kola turbíny.....	14
9. Metoda CTA	16
10. Kalibrace měřících zařízení	17
10.1. Kalibrace pneumatických sond	18
10.2. Kalibrace CTA sondy	21
10.2.1. Sestavení kalibrační rovnice	22
10.2.2. Porovnání přesností metod	24
10.3. Kalibrace odporového teploměru PT100.....	24
10.3.1. Interpolační metody	25
10.3.2. Vyhodnocovací metody hodnot teploty z kalibračních dat	26
11. Praktická část	27
11.1. Výpočet proudových parametrů lopatkového kola	27
11.1.1. Příprava úkolu 1	27
11.1.2. Postup výpočtu.....	28
11.1.3. Výsledky měření	31
11.2. Kalibrace Prandtlovy sondy – v jednom směru, v síti.....	34
11.2.1. Příprava úkolu 2	34
11.2.2. Postup výpočtu.....	34
11.2.3. Výsledky měření	35
11.3. Měření metodou HWA a určení frekvence turbíny.....	36
11.3.1. Příprava úkolu 3	36
11.3.2. Postup výpočtu.....	36
11.3.3. Výsledky měření	37
11.4. Kalibrace 3-otvorové sondy a vyhodnocení kalibračních konstant	37

11.4.1.	Příprava úkolu 4.....	37
11.4.2.	Postup výpočtu.....	38
11.4.3.	Výsledky měření	39
11.5.	Odhad nejistot načítání tlaku 3-otvorové sondy. Statistické vyhodnocení.....	42
11.5.1.	Příprava úkolu 5.....	42
11.5.2.	Postup výpočtu.....	42
11.5.3.	Výsledky měření	46
12.	Závěr.....	50
13.	Použitá literatura	54
14.	Seznam obrázků	56
15.	Přílohy	57

Přehled použitých zkratk a symbolů

Uvádím pouze zkratky, jež nejsou obecně známy. Veškeré použité symboly, značky nebo zkratky jsou přinejmenším jedenkrát vysvětleny v textu v místě výskytu.

CTA „Constant Temperature Anemometry“ obdobný název pro HWA.

HWA „Hot Wire Anemometry“ měřící metoda využívaná při měření v mechanice tekutin založena na principu přestupu tepla z okolí do drátkového nebo blánového senzoru.

RTD „Resistance Temperature Detectors“ označení odporových teploměrů.

1. Úvod

Cílem bakalářské práce bylo za pomoci experimentálně získaných dat vybranými typy sond vyhodnotit parametry volně se otáčejícího kola uchyceného za dýzou kalibračního tunelu. Za pomoci jednotlivých sond a metodik popsát chování kola. Druhou neméně důležitou částí byla vlastní kalibrace používaných sond při měření. Kalibraci sond je možné provádět jak ve statickém stavu, tak i ve stavu dynamickém. Zmíněny byly obě metodiky, kterých je v průmyslu využíváno. Konkrétně v experimentální budově plzeňské společnosti Doosan Škoda Power.

Obecně existuje několik druhů sond. Sondy rozdělujeme na sondy pneumatické a sondy s elektrickým obvodem. Pneumatické sondy odečítají velikost tlaku za pomoci tlakových převodníků. Tlak je jednou ze stavových veličin proudícího média. Současně je odečítána i teplota použitého média. Využívané pneumatické sondy byly Prandtlova, Pitotova a 3-otvorová. U metody HWA se pracovalo s modelem sondy 55P11.

U pneumatických sond bylo možné na základě naměřených tlaků z termodynamických vztahů určit parametry absolutních a relativních rychlostí w , úhlu náběhu a výstupu α a statických a celkových teplot v určitých částech stupně turbíny. Z geometrických vztahů pak byla vypočtena obvodová rychlost u . Tímto způsobem bylo provedeno analytické „osahání“ lopatkového kola. Aby pro následná měření bylo známo, jaké výsledky od turbíny a vzduchového tunelu očekávat.

HWA (angl.: Hot Wire Anemometry) metoda, též CTA (angl.: Constant Temperature Anemometry), je metoda, která využívá rychlé teplotní změny, ke které dojde na wolframovém drátku sondy. Tenký wolframový drátek natažený mezi hroty vidličky je ohříván na konstantní teplotu. Teplota je pomocí měřícího můstku udržována konstantním odporem. Tekoucí médium ochlazuje určitou rychlostí drátek, teplotní změna je promítnuta do změny odporů na můstku, a tím i napětí. Sonda je velmi citlivá a má vysokou čtecí schopnost. Frekvence odečtu může být až 100 kHz. Výstupem z měření je periodicky se opakující signál. Špičky signálu značí lopatkovou frekvenci, to znamená počet tzv. úplavů. Lopatková frekvence je otáčková frekvence kola krát počet lopatek na kole. Zjištěním velikosti periody a její převrácené hodnoty, frekvence, lze rychle ověřit periodicitu dat.

Kalibrace sond je nedílnou součástí procesu měření dat. Pokud by sonda nebyla kalibrovaná, její výsledky by byly nedůvěryhodné. Kalibrace je nastavení sondy takovým způsobem, aby odměřené hodnoty odpovídaly hodnotám etalonovým za stejných podmínek.

Při kalibraci Prandtlovy sondy bylo zkoumáno ideální natočení do proudu média při jedno a dvouosové kalibraci. Při dvouosové kalibraci byla sestavena síť, kterou Prandtlova sonda musela po jednotlivých bodech projít. V obou případech se jednalo o statickou kalibraci. U kalibrací byly využívány již kalibrované referenční sondy.

U 3-otvorové sondy jsou pro kompletní kalibraci zapotřebí kalibrační koeficienty. Tyto koeficienty slouží k nalezení vztahu mezi obecně naměřenými daty a proudovými parametry. Měření zprvu probíhá v proudu se známými parametry. Ziskem koeficientů závislostí naměřených tlaků na úhlu natočení se zjistí regresní rovnice. Těch je následně využito ke zpětnému zisku skutečných celkových a statických tlaků a úhlu natočení při měření v obecném

proudění. Tím zjišťujeme proudové parametry neznámého měřeného proudu. Pod proudovými parametry si lze představit celkový a statický tlak nebo směr a rychlost tekutiny.

Podívali jsme se i na odhad nejistot v měření. Neexistují žádné přístroje, které by byly schopny odměřit s absolutní přesností. Z tohoto důvodu se zavádí pojem nejistota měření. Je to míra pochybnosti o přesnosti výsledku. Výsledkem odhadu je střední hodnota \pm odhad nejistoty. K odhadu nejistot se využívá statistiky. Určují se věci jako jsou střední hodnoty, mediány, nejčastější hodnoty, četnosti hodnot v určitých intervalech, směrodatné odchylky. Na četnosti se váže Gaussova křivka normálního rozdělení. K odhadu nejistot směrodatnými odchylkami se využívá pravidla 68-95-99,7.

Na závěr porovnáme rychlosti získané pneumatickou Prandtlovo sondou a CTA sondou.

2. Experimentální tunely

2.1 Rozdělení tunelů

Tunely jsou podle své výkonosti a využití rozděleny na nízko rychlostní, které pracují s nižším Machovým číslem do 0,4, podzvukové, jež pracují s vyššími Machovými čísly od 0,4 do 0,75, transsonické, které se svou rychlostí blíží nebo mírně převyšují rychlost zvuku v prostředí, v rozmezí 0,75 – 1,2 Machu a nadzvukové s rozmezím od 1,2 do 5 Machů.

Při tvorbě BP bylo využíváno nízko rychlostního tunelu. Tyto tunely jsou charakterizovány maximální rychlostí 134 m/s. Aerodynamické tunely se využívají již od 40 let 20. století ve výzkumných a vývojářských stanicích. Zejména v leteckém a automobilovém průmyslu. Tunely slouží k vytvoření podmínek, které odpovídají podmínkám skutečným, jež působí na reálný stroj při jeho provozu. Tyto podmínky nemusí být identické, nýbrž v určitém poměru v závislosti na poměru testované modelu vůči skutečnému stroji. Často se využívá podobnostních čísel jako je např. Reynoldsovo, Machovo, Prandtlovo, Grashofovo, aj. Tyto čísla musejí být identická jak pro model, tak dílo. V případě nízko rychlostních tunelů je konstrukce uzpůsobena tak, že Reynoldsovo číslo mezi modelem a skutečným strojem se neliší.

Zajímavým a užitečným faktem, který následuje podobnostní vztahy, je ten, že Reynoldsovo číslo je neměnné, a to i v případě měnící se kombinace velikosti modelu a působící rychlosti sloužící tvorbě určitého Reynoldsova čísla za předpokladu, že tekutina, její teplota i tlak v proudící tekutině jsou konstantní.

Ve společnosti Doosan Škoda Power slouží experimentální tunel též k určování charakteristik lopatkového kola z proměnných hodnot tlaků pomocí sond (Prandtlovy či Pitotovy) a ke kalibraci těchto sond. Sondy jsou užívány k proměřování tlaků v lopatkových strojích jaderných elektráren Dukovany či Temelín [1].

2.2 Návrh tunelu

Zásadní otázkou bývá, která z těchto dvou konstrukcí je výhodnější z hlediska četnosti využívání, velikosti plochy (kam bude tunel umístěn), hlučnosti zařízení a finančních možností zákazníka. První možností je tunel s otevřeným oběhem. Konstrukce tohoto tunelu

je většinou nižší z důvodu úspory na vytvoření vlastního oběhu s uzavřeným vzduchem. V tomto případě je nasáván atmosférický vzduch z haly. Avšak požadavky poměru velikosti haly vůči velikosti tunelu jsou vyšší z důvodu, aby ventilátor nasával dostatečně kvalitní množství vzduchu, a tím zajišťoval kontinuální průtok vzduchu tunelem. Nevýhodami je, že chladné počasí a vítr může mít negativní dopad na výsledky měření, a proto musí být tunel uložen v hale, jež zajišťuje homogenní podmínky. Další nevýhodou tunelů s otevřeným koncem jsou vyšší operační náklady a hlučnost. Právě z tohoto důvodu jsou využívány zejména na školách a univerzitách, kde nedochází k častému využívání. Z důvodu nižších operačních nákladů, snížení hlučnosti a s tím související odpadnutí omezení na provozní hodiny. To obstarává druhá možnost, kterou je tunel s uzavřeným oběhem. Tento tunel má vyšší pořizovací cenu, jelikož má větší nároky na materiál, který tvoří plášť uzavřeného okruhu. V rozích tohoto okruhu jsou nainstalovaná lopatková kola, která zajišťují optimální průchod vzduchu oběhem [1].

Námi užívaný tunel ve společnosti Doosan Škoda Power R&D Centre byl navržen odborníky z Akademie věd ČR. Jedním z nich byl pan prof. Ing. Václav Uruba CSc., vedoucí mé práce. Jednalo se o tunel s otevřeným oběhem, na jehož konci byl nainstalován model turbíny o průměru 250 mm. Vzduchový kompresor a motor ventilátoru byly poháněny ze sítě. Rozměry tunelu jsou odhadem 15 m na délku a v nejširším bodě průřezu dosahuje přibližně průměru

2 m. Kruhový průřez tunelu se zprvu rozšiřoval, ke konci umístěné turbíny se opět zužoval. Vzduchový tunel obsahoval několik vrstev, které zabezpečovaly, že vhněný vzduch byl rovnoměrně rozprostřen po celém jeho průřezu, a to zejména v místě ústí tunelu, kde se proměřují charakteristiky kola. V horní části byl do vzduchového tunelu zaveden odporový teploměr. Po obvodu se nacházely vstupy k detekci tlaků.

3. Hardwarové vybavení a komunikace (řetězec)

Zapojení hardwarového vybavení bylo uzpůsobeno tak, aby mezi sebou jednotlivá zařízení komunikovala.

K měření tlaků ve vzduchovém tunelu bylo využito propojení přes tlakový převodník NETScanner 9116 od společnosti Pressure Systems, jež funguje na principu Venturiho trubice a ethernetovou sítí. Hodnota barometrického tlaku byla zjišťována z VEGAMETu, který byl připojen k měřicímu zařízení ROSEMOUNT. Zařízení spolu komunikovala přes HART. U měřicího zařízení ROSEMOUNT se konkrétně jednalo o typ 305151 s rozsahem 0 ÷ 206 kPa. VEGAMETem, který odečítal konkrétní barometrický tlak, se vysílal digitální signál TCP/IP protokolem do ethernetové sítě.

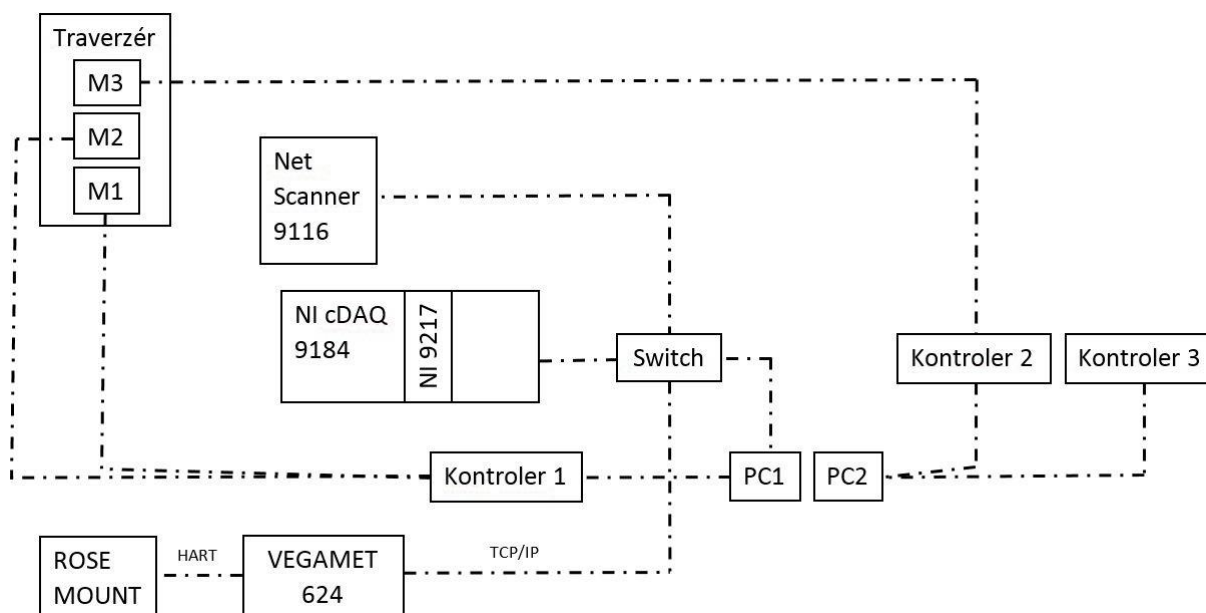
Teplota byla zaznamenávána odporovým teploměrem PT100 připojeným 4 vstupy na kartu NI 9217 uložené v šasi NI cDAQ 9184. U čtyřvodičového zapojení došlo ke kompenzaci odporu přívodního elektrického vedení, a proto byl měřen přímo odpor teploměru. Převodník komunikoval prostřednictvím HART komunikátoru a vysílal signál o rozsahu 4 ÷ 20 mA. Signál byl digitalizován kartou NI 9217.

Drátková sonda byla připojena k osobnímu počítači prostřednictvím kontroleru (kontroler 3). Drátková sonda byla tvořena „vidličkou“, jejíž hroty byly spojeny wolframovým drátkem (senzorem) o délce 1,25 mm a průměru 5 μm. Senzor byl zapojen do Wheatstonova můstku

a zahříván elektrickým proudem. Servozesilovač zachovával můstek v rovnováze. Proměnným proudem byl udržován stálý odpor, a tím i teplota senzoru, jež klesala z důvodu chlazení protékající tekutinou. Napětí na můstku reprezentovalo tepelný přechod a přímo tak odpovídalo rychlosti tekutiny. Při experimentu byly využívány sondy společnosti Dantec Dynamics, zejména model 55P11.

Tříosý traverzér Dantec Dynamics zajišťoval správné uchycení sondy a její pohyb v osách x, y, z. Pohyb byl zajištěn třemi motory (M1, M2, M3). Pomocí softwaru, na míru vytvořeného pro společnost Doosan, byla nastavena požadovaná poloha, popřípadě i krok posuvu v určitých směrech.

Kontrolery se staraly o propojení motorů traverzéro s řídicími počítači. Počítače zachycovaly a uchovávaly naměřené hodnoty. Data byla následně zpracována softwarovými programy, např. Matlab, Excel či LabView.



Obr. 1: Schéma zapojení měřicího řetězce

4. Měřicí zařízení ve vnitřní části tlakového převodníku

Pro tekutinu v klidovém stavu platí, že tlak je roven síle kolmo působící na plochu, což je $dp = \frac{dF}{dA}$.

Z tohoto důvodu se na tlak můžeme dívat jako na mechanický koncept, který lze popsat veličinami hmoty, délky a času. Z pozorování vyplývají tři následující výroky.

1. Tlak je velice ovlivněn pozicí uvnitř statické tekutiny. V konkrétní poloze avšak nezáleží na směru, a proto si spojujeme změnu tlaku se změnou výšky. Tohoto faktu je využíváno v manometrii, což je jeden z mnoha způsobů měření tlaku.

$$dp = -w \cdot dh, \text{ kde } w \text{ je hmotnost tekutiny}$$

2. Tlak není nijak ovlivněný hranicemi nádoby, ve které je tekutina uzavřena. To nám poskytuje širokou možnost návrhů tlakových převodníků.
3. Tlak se rozmístí do všech prostor uzavřené nádoby.

K měření tlaků rovnoměrně proudící tekutiny se již od 17. století používají manometry. Přístroj je založen na hydraulickém principu. U trubice je většinou skleněná trubice zahnutá do tvaru písmene U. Tzv. U-trubice je částečně naplněna tekutinou vhodnou pro měření, většinou se volí rtuť a voda. Ke změření tlaku tekutiny je tekutina nalita do jedné strany trubice, z druhé strany působí na tekutinu manometru známý referenční tlak. Rozdíl mezi referenčním tlakem a tlakem na druhé straně je hmotnost tekutiny na jednotku plochy a rozdílu ve vychýlení hladin sloupců tekutiny, podle vzorce:

$$\Delta p = w_M \Delta h_E,$$

kde w_M je korigovaná hmotnost tekutiny manometru v závislosti na teplotě a gravitaci, Δh_E je změna výšky tekutiny manometru v závislosti na teplotě a kapilárních efektech.

Korekce hmotností pro vodu a rtuť za různých teplot a při různých gravitačních zrychleních jsou již velmi přesně empiricky vyjádřeny. Korekce pro vodní sloupec v tlakovém převodníku je taktéž faktorem a její průběh je taktéž empiricky vyjádřen.

$$c_h = \left\{ 1 + \left(\frac{w_B}{w_M} \right) \left(\frac{h_B}{\Delta h_I} \right) - \left(\frac{w_A}{w_M} \right) \left[\left(\frac{h_A + h_B}{\Delta h_I} \right) + 1 \right] \right\}, \text{ kde}$$

w_B je korigovaná hmotnost první tekutiny manometru, w_M je korigovaná hmotnost druhé tekutiny manometru, h_A je výška sloupce mezi hrdly U trubice, h_B je výška sloupce tekutiny B, Δh_I je výška rozdílu hladin druhé tekutiny.

V závislosti kombinace první a druhé tekutiny manometru a materiálu trubice z tabulek můžeme nalézt povrchové napětí a úhel smáčení. Tyto veličiny taktéž slouží ke korekci v tlakovém převodníku.

Př.: pro kombinaci „rtuť-vakuum-sklo“ vychází povrchové napětí: $480 \frac{mN}{m}$,
úhel smáčení θ : 140°

V praxi se nejčastěji používají mikromanometry. Mikromanometry jsou využívány pro standardní tlaku v rozmezí $0,0002'' - 20''$ vody a tlaky $0 - 690$ kPa. Mezi tři nejznámější patří Prandtlův typ, mikrometrový typ a vzduchový mikrometr [2].

5. Tlakové převodníky

Tlakový převodník je zařízení ovládáno energií jednoho systému, jež je dodávána druhému systému. Ve své podstatě je tlakový převodník elastickým prvkem, který přeměňuje energii tlakového systému v mechanickému vychýlení měřicího systému.

U novějších typů převodníků už bývá standardem i elektrický prvek, který přeměňuje vychýlení mechanického systému na signál elektrický. Výhodou této technologie je, že elektrický signál je možné zesilovat, vysílat, opravovat a měřit.

Elektrické převaděče se rozdělují na aktivní a pasivní. Aktivní je takový, který si vytváří vlastní elektrický výstup na základě mechanického vychýlení. Pasivní vyžaduje pomocný elektrický vstup, jakožto funkci mechanického vychýlení pro elektrický výstup.

Moderní tlakové převodníky, jakým je i námi využívaný Net Scanner 9116, fungují na piezorezistivním¹ principu. Piezorezistivní tlaková zařízení se skládají hlavně z polovodičů. Piezorezistivita popisuje změnu elektrického odporu, která nastane, pokud na polovodič působí vnější síla. Tato vnější síla způsobuje napětí v zařízení, a tím i změny mechanické energie. Mechanické napětí způsobené působící silou ovlivňuje materiálové vodivostní pásy a chování elektronů. Některé z elektronů mohou být excitovány do vodivostního pásu. Projevem této změny je nárůst nebo pokles odporu. U piezorezistivity nelze, aby se elektrické napětí šířilo celým zařízením, jako je tomu u piezoelektrického efektu. Odpor je měřen senzory.

Transformací mechanické energie, jakožto důsledku tlaku, dochází ke změně odporu materiálu. Odpor jsme schopni dobře měřit a tím přesně určit konkrétní tlak.

Tyto tlakové převodníky jsou využívány i u rychle fluktuujících aerodynamických tlaků.

Ke správné kalibraci převodníku tohoto provedení se využívá techniky zvané elektrokalibrace. Využívá se excitování krystalů elektrickým polem [3], [4].

6. Měření tlaku v pohybujičích se tekutinách

U dynamických kapalin je potřeba zavést další druhy tlaků než u statických, kde parametry tekutiny popisoval tlak statický. Pohybujičící se tekutiny jsou komplikovanější a k popisu tlaku slouží 3 složky – statický, dynamický a celkový.

Statický tlak, označován p , je tlak, který naměříme v případě, že tekutina je v klidu. Tento tlak je čten malým otvorem po obvodu sondy v kolmé rovině ke směru proudění. Sonda ani otvor by nijak neměly narušovat proudění tekutiny.

Dynamický tlak, značen p_d , je tlakový ekvivalent kinetické energie tekutiny v případě, že je považovaná za kontinuum.

Celkový tlak, značený p_c , je součet tlaku statického a dynamického. Tento tlak je odečítán na „nose“ sondy, kde je vyvrtaný otvor. Proudící tekutina se v tomto místě musí zastavit, tzn. mít nulovou rychlost, a děj musí být izoentropický², tzn., aby nedocházelo ke ztrátám ani přenosu tepla. Otvor dírky je orientován do směru proudící kapaliny.

Matematicky zapsáno: $p_c = p + p_d$

Tento vztah je odvozen ze zákona zachování energie (pro rovnoměrný proud tekutiny) a prvního termodynamického zákona.

Odečítání statického tlaku

Statický tlak může být odečítán alespoň 3 způsoby. Vždy je do sondy vyvrtán malý otvor, přičemž velmi záleží na jeho umístění. První možností je vyvrtání otvoru na povrch sondy po straně sondy v dostatečné vzdálenosti od „nosu“, tím je zajištěno, že tok proudu není narušen. Tyto otvory proslavil D. Bernoulli. Druhým způsobem je, že otvor se opět nachází na povrchu

¹ Slovo piezo je odvozeno z řeckého slova piezein volně přeloženo jako fyzikální tlak. Rezistivita je synonymem pro odpor.

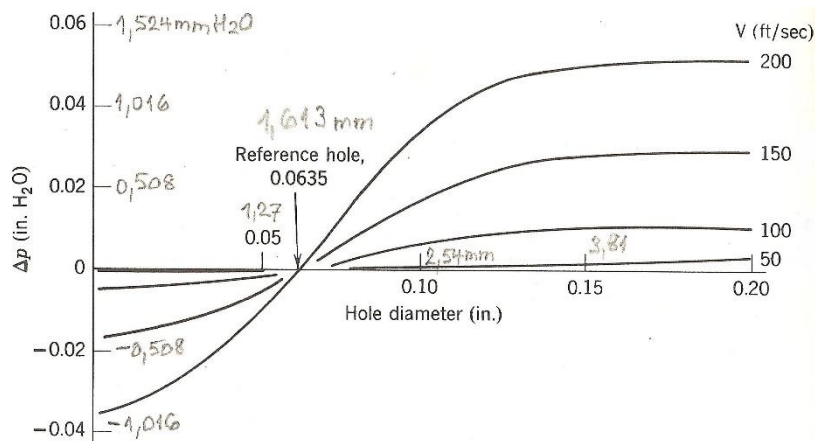
² Izoentropický děj je takový, při němž nedochází ke změně entropie. Takovým dějem může být např.: vratných adiabatický děj.

sondy umístěn tak, aby se ohnutí proudu a ostatní efekty způsobené přítomností sondy vykompenzovaly. Sem patří klasické statické sondy navržené německým inženýrem L. Prandtlem. Další možností je strategické rozmístění otvorů v kritických místech aerodynamických těles, ve kterých se statické tlaky objevují. Do této třídy patří sondy kulové, válcovité, klínové a jehlanové. S každým měřením jsou spojeny nejistoty, které zpochybňují získaný výsledek. Konstrukce a jakost sond a otvorů vnášejí do měření chyby.

Měření statického tlaku je použito jako jedna ze složek k určení pohybu tekutiny.

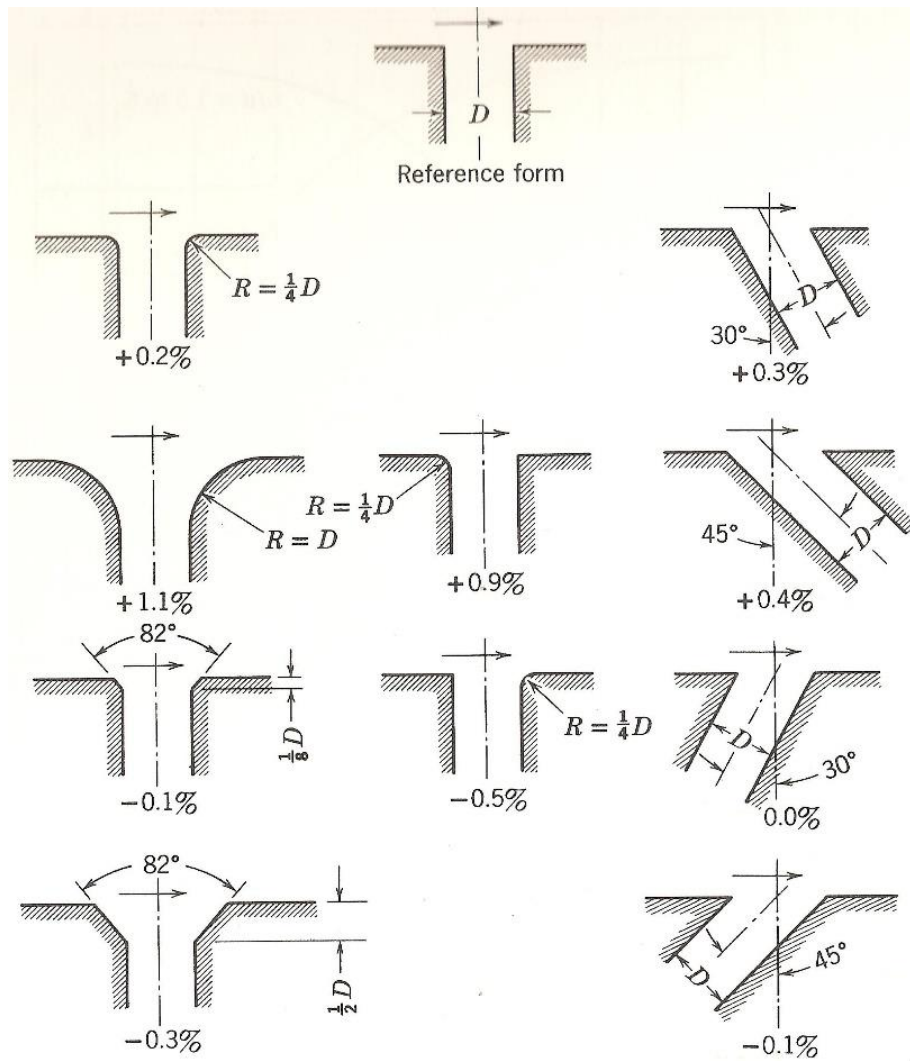
Stěnové odběry

Obecně se předpokládá, že nekonečně malé čtvercové otvory umístěny kolmo na potrubí, kterým proudí tekutina, zajišťují zcela přesné měření. Největším problémem miniaturních otvorů je jejich samotná výroba a zajištění, aby se v otvoru neuchytily sebemenší ořepy. Dalším problémem který vzniká, je fakt, že velmi malé otvory trpí dlouhou odezvou na určení přesného statického tlaku. Z tohoto důvodu byl nalezen kompromis mezi velikostí otvoru a chybou, které větší otvory způsobují. Vědecká bádání a experimenty s proměnnými velikostmi děr objevily funkční závislost mezi velikostí chyby na velikostí otvoru. Tuto závislost můžete vidět na obrázku 2. Ze sledování jsou vytvořeny korekce, které mají za úkol tuto chybu eliminovat.



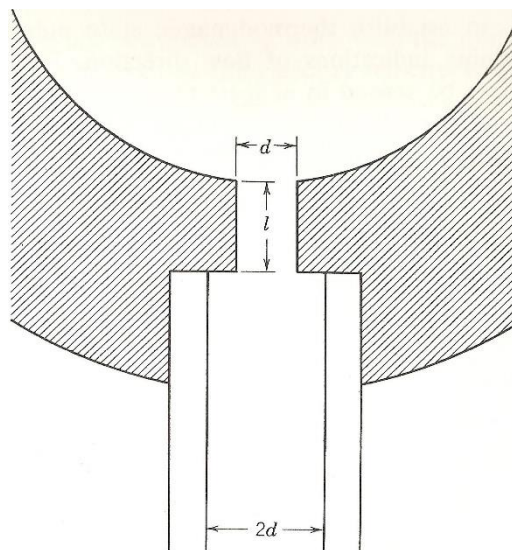
Obr. 2: Hodnota chyby naměřených tlaků v závislosti na velikosti průměru díry odběru [1]

Experimenty s hranami čtvercového otvoru poukázaly na chyby měření z hlediska konstrukce otvorů. Čtvercové ostré a zaoblené hrany vykazují malé odchylky „do plusu“, na druhou stranu sražené hrany vykazují drobné odchylky „do mínusu“. Jak konstrukční řešení otvorů ovlivňuje přesnost měření, ukazuje obrázek 3.



Obr. 3: Chyba ve čtení tlaku způsobené konstrukcí otvorů [1]

Doporučená geometrie otvoru, kde $0,5 < \frac{l}{d} < 6$ je znázorněno na obrázku 4.



Obr. 4: Příklad poměrů hloubky k průměru stěnového odběru [1]

Při průchodu tekutiny okolím otvoru dojde k částečnému rozdělení tekutiny. Větší část tekutiny projde kolem otvoru „bez povšimnutí,“ avšak část se dostane do prostoru čtvercové otvoru. Tato část tekutiny uvede do pohybu již přítomný statický vzduch, a tím dojde k mírnému nárůstu tlaku. Na druhou stranu u zaoblených hran se tok tekutiny ihned nerozdělí. Namísto toho je tok veden do otvoru, kde dojde k nárůstu dynamického tlaku. Při pohybu tekutiny kolem zanořených otvorů dochází k akceleraci vzduchu směrem do otvoru, čímž vznikne podtlak, a tím klesá naměřený tlak.

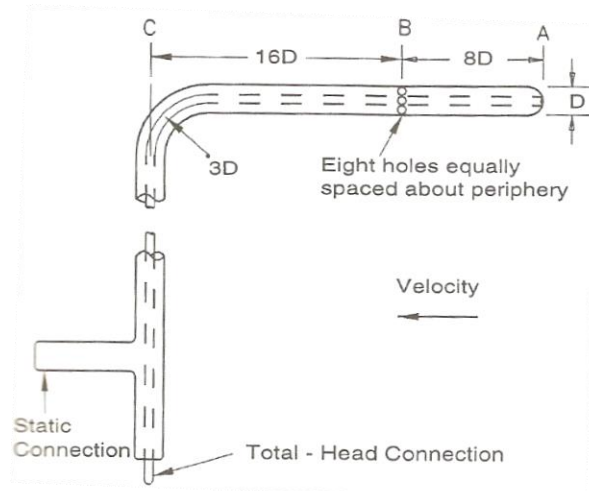
Chyba při měření statického tlaku pro zcela turbulentní proudění je zobecněno vztahem $\frac{\Delta p}{\tau_0}$, kde τ_0 je smykové napětí a třetího Reynoldsova čísla R_d^* , které se odvíjí od průměru otvoru d a třetí rychlosti w^* . Smykové napětí τ_0 charakterizuje gradient rychlosti proudění a ovlivňuje výkonost měření stěnového odběru. Abychom se vyvarovali chybě z poměru délky L a průměru d , podle Shawa musí být poměr větší než 1,5. Při experimentech se poměr $\frac{L}{d}$ obvykle volí v intervalu 1,5 - 15.

Další metodou určení chyby měření a uživatelsky příjemnější, je ta, kdy se do souvislosti dává změna statického tlaku Δp ku tlaku dynamickému p_d . Tuto skutečnost vykreslují křivky podle velikosti Reynoldsova čísla v hladké trubici. Křivky se liší pro různé poměry průřezu otvoru d a průřezu trubice D . Takové určení chyby opět platí pro zcela turbulentní proudění.

Statické trubice

Přesnost měření je ovlivněna umístěním odběrů (na obrázku 5 místo označené B), a to ve vzdálenostech od „nosu“ a podpírací trubičky tzv. stemu. U těchto typů sond se pracuje s vyrušením chyb. První chyba, kde dochází ke zrychlení proudění na „nose“, a tím ke snížení tlaku. Druhou chybou je efekt tzv. stagnace, kdy dojde k zastavení proudu v důsledku nárazu proudu do podpírací trubičky, což vede ke zvýšení tlaku. Správným navržením umístění odběru dojde k vyrušení těchto efektů.

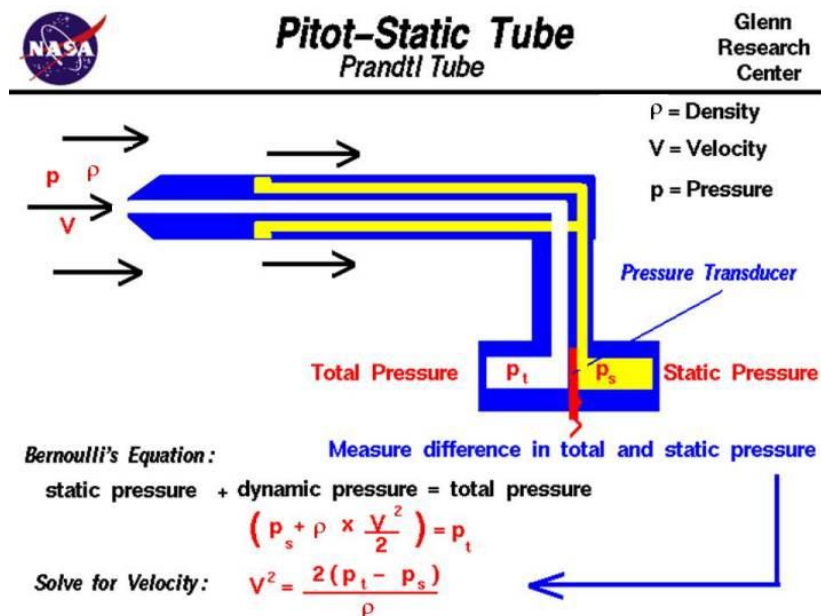
V praxi se využívá rozpoložení, kde 4 čtvercové odběry umístěny kolem dokola trubice pootočený o 90°. Je experimentálně zjištěno umístění otvorů 4-8 průměrů trubičky od „nosu“ sondy a až 16 průměrů sondy od stemu. Druhým konstrukčním řešením je disková sonda, kde okolí otvoru je zapuštěno, což opět působí jako kompenzace, a proto se odečítané hodnoty statického tlaku velmi blíží skutečnému.



Obr. 5: Konstrukční řešení Prandtlovy sondy. Umístění odběrů je shodné pro statickou trubici [1]

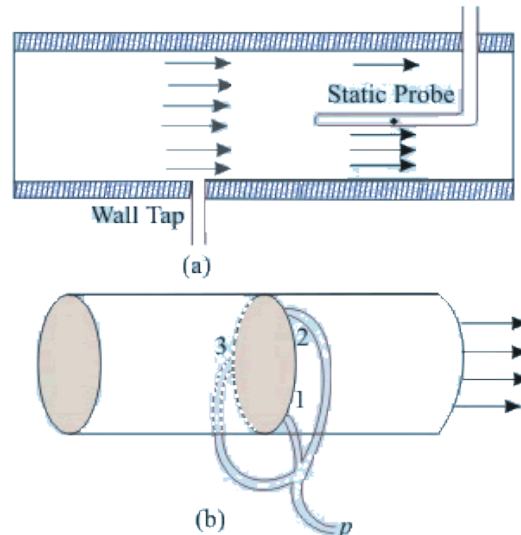
Z obrázku 5 si můžeme všimnout polohy odběrů statického tlaku. Nachází se přibližně 4-8 průměrů D od „nosu“ trubice a přibližně 16·D od stemu. Celkový tlak je odebírán na „nose“, kde dojde k zastavení vzduchu a v ideální případě k bezztrátové přeměně kinetické energie na tlakovou.

Trubičky pro celkový a statický tlak jsou odděleny a vedeny k přípojkám.



Obr. 6: Řez Prandtlovo sondou [5]

Obrázek 6 zobrazuje grafické rozložení drah trubiček pro měření statického a celkového tlaku. Tyto dráhy vedou do tlakového převodníku, kde jsou tlaky měřeny. Z Bernoulliho rovnice je možné vypočítat rychlost proudícího média, čehož je využíváno např.: k určení rychlosti dopravních letadel.



Obr. 7: Grafické znázornění a) stěnového odběru a statické trubice, b) systému stěnových odběrů, kde dochází ke zprůměrování hodnot statického tlaku [6]

Celkový tlak se používá k získání bezztrátových dat a k určení rychlostí a průtoků. Určení skutečného celkového tlaku je za předpokladu, že dojde k zastavení proudu a izentropické přeměně. Využívá se Pitotovy trubice (pojmenována podle francouzského inženýra a vynálezce Henriho de Pitota). Pitotova trubice je zahnuta do pravého úhlu a nasměrována do směru toku tekutiny. Měření tlaku se zdá prakticky jednoduché, avšak existují faktory, které mohou způsobit zvýšení nepřesnosti měření. Jedná se hlavně o konstrukci vlastní sondy, tvar „nosu“, nedostatečnou přesnost natočení do proudu tekutiny, viskózní efekty, pouze za nízkých Reynoldsovo čísel a efektů příčných tlaků gradientu v okolí odběru.

Například sondy s vnějším tvarem válcovitého provedení jsou méně citlivé k ne zcela přesnému umístění do proudu ve srovnání s kuželovými nebo parabolickými tvary sondy. Ke snížení citlivosti těchto chyb se dá přispět zvětšením velikosti otvoru odběru, rovněž pak i bočními úkosy s 15° do hloubky 1,5 násobku průměru D .

Jelikož Reynoldsovo číslo popisuje poměr inertních a viskózních sil tekutiny, nízké Re značí relativně vysoké viskózní síly. Od cca. $Re = 80$ Pitotův koeficient je ustálen kolem požadované hodnoty 1.

V případě, že existuje gradient celkového tlaku, např. rychlostní gradient, potom naměřený tlak je vyšší než tlak skutečný. Toto je způsobeno druhotným tokem, jakožto důsledek přítomnosti sondy ve vířivém proudu. Vhodnějším konstrukčním řešením bylo seříznutí „nosu“ sondy. Avšak zůstalo se u tradičního konstrukčního řešení, pro které byly vytvořeny empirické vzorce:

$$\frac{\delta}{D} = 1,025K - 4,05K^3, \text{ pro } K < 0,3 \text{ a}$$

$$\frac{\delta}{D} = 0,195, \text{ kde } K > 0,3$$

K je střížný parametr rovný $\frac{D(\frac{\Delta V}{\Delta y})}{2V}$, D je vnější průměr sondy a δ je vzdálenost efektivního středu od geometrického středu sondy [1], [2].

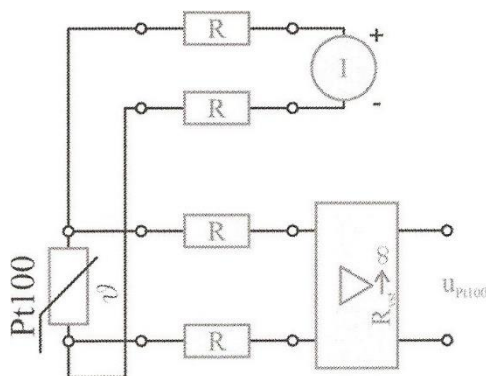
7. Měření teploty v pohybujiících se tekutinách

Teplota je název pro měřitelnou průměrnou kinetickou energii částic v systému. Teplota roste, pokud systém získává teplo.

Nejčastější přístroje k měření teploty jsou kapalinové teploměry či bimetalové pásky, která pracují s tepelnou roztažností látek, dále pak termočláanky, termistory, tekuté krystaly či infračervené kamery a odporové teploměry.

Při našem experimentu bylo využito právě posledně zmíněného odporového teploměru RTD PT100 (Resistance Temperature Detectors). Tento typ vykazuje odpor 100 Ω při teplotě 0 $^{\circ}\text{C}$.

Odporový teploměr využívá teplotní závislosti elektrického odporu snímače. Platinový drátek je navinutý na nevodivý materiál, většinou keramiku, a překrytý vrstvou keramického prášku. Odpor RTD teploměrů roste s jejich teplotou. Platina vyniká téměř lineární závislostí v širokém spektru teplot. Toto spektrum se pohybuje od teplot -200 $^{\circ}\text{C}$ až do 850 $^{\circ}\text{C}$. RTD teploměry fungují na principu odečtu napětí voltmetrem, které je proměnlivé v závislosti na změně odporu, resp. teploty, při konstantním proudu. V laboratorních podmínkách se nejčastěji používá 4 drátkové zapojení, což zajišťuje vysokou přesnost měření (viz obrázek 8).



Obr. 8: Schéma 4 drátkového zapojení teploměru [7]

Známe-li hodnoty proudu a napětí, pak z Ohmova zákona vypočítáme velikost odporu.

$$R = \frac{U}{I}$$

Předpis Ohmova zákona, kde R je odpor [Ω], U napětí [V] a I proud v elektrickém obvodu [A].

Podle evropské technické normy ČSN EN 60751 lze vypočít teplotu v rozmezí teplot 0 až 850 $^{\circ}\text{C}$ na základě znalosti odporu R_0 (odpor za teploty 0 $^{\circ}\text{C}$, v našem případě 100 Ω) a odporu R_t , tj. odpor za teploty t, který byl vypočítán podle vzorce:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2)$$

Konstanta $A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$B = - 5,775 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

Zkoumáme tři různé teploty: statickou, dynamickou a celkovou.

Statická teplota (T) je teplota tekutiny za jakýchkoliv podmínek, v klidu nebo za pohybu. Je měřena jako průměrná náhodná kinetická energie molekul. Obvykle je použita adiabatická sonda za tepelné rovnováhy a za relativního klidu mezi tekutinou a sondou.

Dynamická teplota (T_D) – Tato složka teploty je určena jako přímá kinetická energie kontinua.

Celková teplota (T_C) – Skládá se ze složky statické a dynamické. Za ideálních podmínek tekutiny i sondy jsme ji schopni měřit v případě, že proudící médium je zastaveno na „nose“ nehybné sondy.

$$T_C = T + T_D$$

Podmínkou takového měření je, že se jedná o tzv. izoentropickou přeměnu, tj. jedná se o vratné a adiabatické zastavení proudu sondy.

Reálná tekutina však nespĺňuje ideální podmínky. Tato tekutina není schopna vratných procesů. To je například zastavení proudu. Navíc tekutina je viskózní a její síly působí jako třecí síly v tekutině. V případě reálné tekutiny využíváme tzv. stagnačního faktoru S a dynamických korekčních faktorů R nebo K , pomocí kterých lze určit skutečnou celkovou teplotu. U reálné tekutiny T_C není shodná s $T_{\text{stagnační}}$.

$$T_{\text{stag}} = T + S \cdot T_D$$

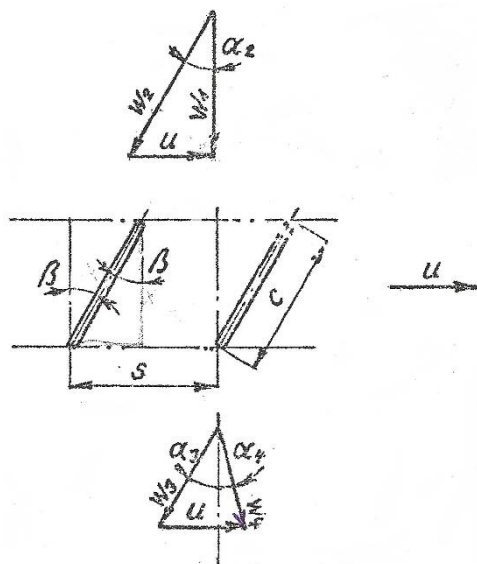
Dynamické korekční faktory slouží ke korekci v případě, že Prandtlovo číslo se liší od 1 [2],[8],[9].

8. Popis oběžného kola turbíny

Oběžné kolo umístěné na konci vzduchového tunelu má průměr 250 mm. Po obvodu je rozmístěno 30 lopatek. Rozteč mezi lopatkami je 21,039 mm na špičce lopatky. Délka jedné lopatky je 85 mm. Poloměr paty a špičky lopatky od středu je 35 mm a 120 mm. Úhel nastavení lopatky β roste od paty směrem ke špičce, a to v rozmezí $37,5^\circ$ až 67° . Je popsán kvadratickou funkcí $f(R) = (-0,0015602 \cdot R^2 + 0,60653 \cdot R + 18,183)$, kde R je poloměr od středu oběžného kola. Oběžné kolo imituje první stupeň turbíny. Využitím modelu takto navrženého kola jsme schopni za pomoci podobnostních čísel, zejména Reynoldsova, Prandtlova a Grashofova, určit skutečné chování turbíny.

Z hlediska účinnosti turbíny je správné nastavení lopatek a jejich zakřivení kritickým prvkem. S expanzí páry je vyvíjen tlak na délku lopatky a její přesné nastavení do proudu tak, aby přicházející pára vykonala co největší možnou práci. Pára by měla dopadat na lopatku takovým způsobem, aby nedocházelo k incidenci (utržení vrstev po hraně lopatky), a tím nerostla ztráta. Aby lopatky mohly být ideálně navrženy a následně vyráběny, je potřeba provést pečlivě organizovaný experiment, který potvrdí nebo vyvrátí korektnost designu

lopatek. U oběžných kol se tedy měří určité veličiny, klasicky statické a celkové tlaky před a za oběžnými koly. S jejich pomocí se vypočtou ostatní proudové parametry, jako rychlost proudu w , úhel proudu α , úhel lopatky i úhel nastavení lopatky β , úhel náběhu proudu na lopatku i , aj. Tyto parametry jsou podkladem pro tvorbu rychlostních trojúhelníků vstupujících a vystupujících ze stupně. Při rotaci lopatkového stroje se v čase výstupní trojúhelník mění z důvodu úplavů.



Obr. 9: Rychlostní trojúhelníky na vstupu a výstupu z oběžného kola. Úhel nastavení a rozteč lopatky [10]

Značení:

u – obvodová rychlost rotující lopatkové mříže [m/s]

w_1 – absolutní rychlost proudu na vstupu do lopatkové mříže [m/s]

w_2 – relativní rychlost proudu na vstupu do lopatkové mříže [m/s]

w_3 – relativní rychlost proudu na výstupu z lopatkové mříže [m/s]

w_4 – absolutní rychlost proudu na výstupu z lopatkové mříže [m/s]

α_2 – úhel relativního proudu na vstupu do lopatkové mříže [°]

α_3 – úhel relativního proudu na výstupu z lopatkové mříže [°]

α_4 – úhel absolutního proudu na výstupu z lopatkové mříže [°]

β – vstupní a výstupní úhel lopatky, který je v případě nezakřiveného profilu lopatky roven úhlu nastavení profilu [°]

c – tětiva lopatky [mm]

s – rozteč lopatkové mříže [mm]

Lopatky oběžného kola jsou navrženy tak, že jejich nakroucení odpovídá zvolené rychlosti w_1 proudu na vstupu. Tento proud vstupuje axiálně. Mimo prostory úplavů jsou rychlostní

trojúhelníky na vstupu a výstupu identické. Absolutní výstupní proud bude mít taktéž axiální směr. V rozmezí úplavu však dochází ke změně velikosti absolutní rychlosti w_4 a tím i úhlu α_4 . Úhel α_3 považujeme v celém rozsahu konstantní, jelikož úplavy způsobují zanedbatelné zakřivení proudu.

Šířka úplavů a jejich hloubka, poměr místní rychlost proudu w_3 k rychlosti proudu w_3 mimo úplav, jednak závisí na charakteristice lopatkové mříže a jednak na vzdálenosti odběru od odtokových hran.

K ideálnímu odečtu tlaků a směrů proudů α_4 by sonda musela zachytit vlivy jako např.: poměr šířky úplavu k rozteči lopatek, frekvenci úplavů, narušení proudu vlivem geometrie sondy, nebo vzdálenosti měření od odtokových hran. Aby tato chyba byla redukována, provádí se kalibrace sondy. Kalibrace zkoumá naměřené hodnoty poskytnuté sondou za různých provozních či technických podmínek. Výsledky jsou porovnávány s již známými etalonovými podmínkami a jejich již známými hodnotami. Etalonové hodnoty vázající se k podmínkám jsou jak teoreticky, tak experimentálně ověřeny [10].

9. Metoda CTA

CTA (Constant Temperature Anemometry) je metoda, které se využívá pro měření rychlost proudu s velmi vysokými frekvencemi fluktuací, až 100 kHz.

Využívá se sond vidličkového tvaru. Mezi hroty je natažen wolframový drátek o průměru 5 μm . Sonda je ukotvena do toku proudu. Tok proudícího média ochlazuje senzor. Aby byla zajištěna její stálá teplota, využívá se Wheatstonova můstku a tenkosti drátku k rychlé a přesné odezvě. Můstek je udržován v rovnováze přívodem elektrického proudu takové velikosti, aby odpor sondy, respektive její teplota (cca 200 °C), zůstala konstantní bez ohledu na chlazení sondy tokem. Napětí na můstku popisuje přenos tepla mezi drátkem a okolím, což přímo odpovídá velikosti rychlosti.

$$Q = (T_w - T_o)A_w h = A + BU^n; n \approx 0,5$$

Q – teplo odevzdané do okolí sondou

T_w – teplota drátku sondy

T_o – teplota okolí

A_w – plocha senzoru

h – koeficient přenosu tepla

A, B, n – koeficienty

U – rychlost média

Citlivost sondy na změnu rychlosti je způsobena 4 drátovým zapojením do Wheatstonova můstku a nízkou teplotní setrvačností senzoru. Vztah mezi napětím můstku a rychlostí proudu lze zapsat dvěma způsoby – exponenciálně či polynomem.

$$E^2 = (T_w - T_o)(A + BU^{0,5})$$

E – napětí můstku

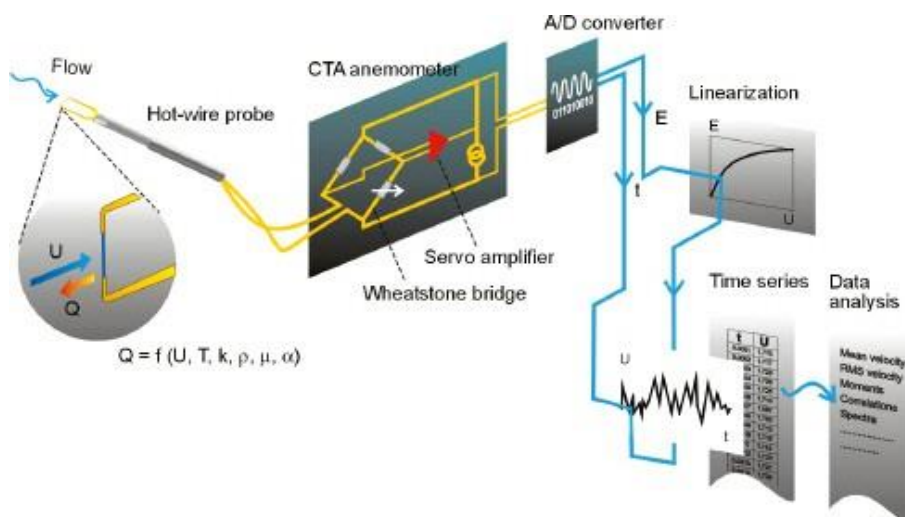
Ustanovení vztahu mezi naměřeným napětím a rychlostí se provádí po kalibraci tzv. linearizací.

Korekci je nutno provádět i v případě změny teploty. Napětí můstku totiž záleží jak na rychlosti média, tak na teplotě okolí. Změna teploty o 1 K naruší přesnost záznamu rychlosti přibližně od 2 %. Napětí je nutno korigovat před linearizací signálu. Využívá se poměru mezi teplotou během kalibrace sondy (T_o) a během vlastního měření (T_{meas}), dle vztahu uvedeného níže.

$$E_{corr} = E \left(\frac{T_w - T_o}{T_w - T_{meas}} \right)^{0,5}$$

Sondy s více senzory jsou schopny zachytit jak rychlost, tak směr proudu. To však není případ námi používané jednodrátkové sondy od společnosti Dantec Dynamics model 55P11. Tato sonda reaguje pouze na změnu teploty drátku a není schopna určit směr ani orientaci proudění.

Naměřené hodnoty napětí, rychlostí a času jsou A/D převodníkem transformovány do signálu o rozsahu 4 ÷ 20 mA, který je následně linearizován a digitalizován kartou NI 9217 a následně zpracováván výpočetní technikou. Naměřené hodnoty mohou sloužit pro zjištění amplitudy rychlostí a časově závislé statistiky jako intenzita turbulence či momenty vyšších řádů (fluktuace, rozptyl, směrodatná odchylka, šikmost, špičatost).



Obr. 10: Schématický postup měření s CTA sondou [11]

K získání požadovaných výstupů je nutno signál zpracovat. A to takovým způsobem, že jsou eliminovány výchytky, které narušují homogenitu signálu a svou existencí by způsobovaly výrazné statistické odchylky. Výstupem tohoto měření je určení lopatkové frekvence. Znat tuto frekvenci je důležité z důvodu ověření charakteru periodicity dat. V průběhu signálu by se měly objevovat špičky a poklesy, které symbolizují úplavy za každou lopatku. Pokud otáčky kola zjištěné z dat odpovídají otáčkám při experimentu, lze považovat data za věrohodná. Naměřené hodnoty rychlostí mohou být potom považovány za korektní.

10. Kalibrace měřicích zařízení

Abychom si byli jisti, že naměřená data jsou správná. Je nezbytně nutné, aby samotná měřicí zařízení byla schopna určit hodnoty s minimální chybou. K odstranění této chyby se využívá

tzv. kalibrace. Kalibrace je korelace naměřených hodnot zařízení se standardními hodnotami za účelem zjištění jeho přesnosti a jeho optimálnímu nastavení.

Většina kalibrací se provádí za již známých podmínek v porovnání s etalonovými nebo referenčními hodnotami. Rozsah nastavení je proměnlivý a ve velké míře záleží, za jakých podmínek bude samotný experiment proveden a v jakém rozmezí se budou měřené hodnoty při experimentu pohybovat.

10.1. Kalibrace pneumatických sond

Ke kalibraci se využívá více metod. Měřené hodnoty se porovnávají s teoretickými. Hodnoty se měří na výstupu z oběžného kola pro:

- Daný rozsah vzdáleností sondy od roviny odtokových hran, kde je sondou posouváno pouze v axiálním směru.
- Různý poměr šířky úplavu k rozteči. Toho je docíleno posuvem sondy v radiálním směru k ose oběžného kola za konstantní lopatkové frekvenci. Posuvem od vnitřku k vnější části kola roste rozteč lopatky, šířka úplavu se nemění.
- Různé lopatkové frekvence. Turbínka má danou rychlost otáčení. Lopatková frekvence f_{lop} je závislá na počtu lopatek. Aby bylo docíleno změny lopatkové frekvence, při neměnné rychlosti otáčení turbíny, je potřeba změnit počet lopatek v náboji oběžného kola. Otvory po odstraněných lopatkách je třeba zalít.
- Různé rychlosti média. Realizovány různě velikým teplotním spádem. Pro zachování stejných otáček, a tím i stejné lopatkové frekvence při různých rychlostech proudu je třeba vytvořit originální rotor s příslušně nastavenými a zkroucenými listy lopatek.
- Měření ztrátového součinitele ξ . Nutná hodnota pro vyhodnocení parametrů proudu. Je potřeba jej znát v rozsahu úplavu za lopatkou parametricky pro různé rychlosti proudu a vzdálenosti za odtokovou hranou lopatky turbíny. Měření je provedeno staticky na lopatce vystavené proudu vzduchu na výstupu z dýzy. Celkové tlaky se měří za kolem a před dýzou. Celkový tlak za kolem je měřen miniaturní Pitotovou sondou. Pro přesné odečítání hodnot za kolem je sonda upevněna v traverzěru. Odečet probíhá v místech největších tlakových gradientů se zvoleným krokem. Krok závisí na velikosti gradientu. U nižšího může být posuv větší.

Způsob vyhodnocení

Výše zmíněné metody jsou způsoby, jakými je možné získat relevantní data. Z uvedených metod vyplývá, že je možné stanovit skutečné hodnoty na základě naměřených parametrů pracovního média před turbínkou, z geometrických tvarů lopatek, ze staticky naměřených hodnot ztrátového součinitele v závislosti na relevantní rychlosti proudu a vzdálenosti od odtokové hrany lopatky a nesmíme opomenout ani otáčky turbíny či obvodové rychlosti lopatek v referenčním bodě a za známého statického tlaku za turbínkou (barometrického).

Odchylka mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami parametrů na základě vlastní geometrie olopatkování. Snahou je nalezení koeficientů, jež tuto chybu napraví.

Legitimní postup dynamické kalibrace dle Doosan Škoda Power je následující:

- 1) Stanovení středních hodnot celkových tlaků $p_{c4stř}$ z aritmetického středu místních hodnot p_{c4i} celkových tlaků v rozmezí jedné rozteče s dle vztahu $p'_{c4stř} = \frac{\sum \Delta s * p_{c4i}}{s}$.
Nebo přesněji vyváženým proteklým množstvím z výrazu $p'_{c4stř} = \frac{\sum \Delta s * p_{c4i} * \cos \alpha_{4i} * w_{4i}}{\sum \Delta s * \cos \alpha_{4i} * w_{4i}}$, kde α_{4i} je výstupní úhel proudu a w_{4i} je výstupní rychlost.
- 2) Střední hodnoty výstupního úhlu $\alpha_{4stř}$, se určí z výrazu $\alpha_{4stř} = \frac{\sum \Delta s * \alpha_{4i}}{s}$. Opět tuto hodnotu můžeme vyjádřit přesněji dle vyváženého proteklého množství $\alpha'_{4stř} = \frac{\sum \Delta s * \cos \alpha_{4i} * w_{4i} * \alpha_{4i}}{\sum \Delta s * \cos \alpha_{4i} * w_{4i}}$.
- 3) V referenčním místě za turbínkou je naměřen p_{cm} celkový tlak, p_{sm} „statický“ tlak a úhel α_{4m} proudu sondou.
- 4) Vzájemná závislost naměřených a vypočítaných (skutečných) hodnot parametrů pak vyjádříme ve vhodně uspořádaných grafech.

Vyjádříme:

$$x_d = \frac{p_{d4m}}{p'_{d4stř}} = \frac{p_{c4m} - p_{s4m}}{p'_{c4stř} - p_{s4}}$$

$$x_c = \frac{p'_{c4stř} - p_{c4m}}{p'_{d4stř}} = \frac{p'_{c4stř} - p_{c4m}}{p'_{c4stř} - p_{s4}}$$

$$x_s = \frac{p_{s4m} - p_{s4}}{p'_{d4stř}} = \frac{p_{s4m} - p_{s4}}{p'_{c4stř} - p_{s4}}$$

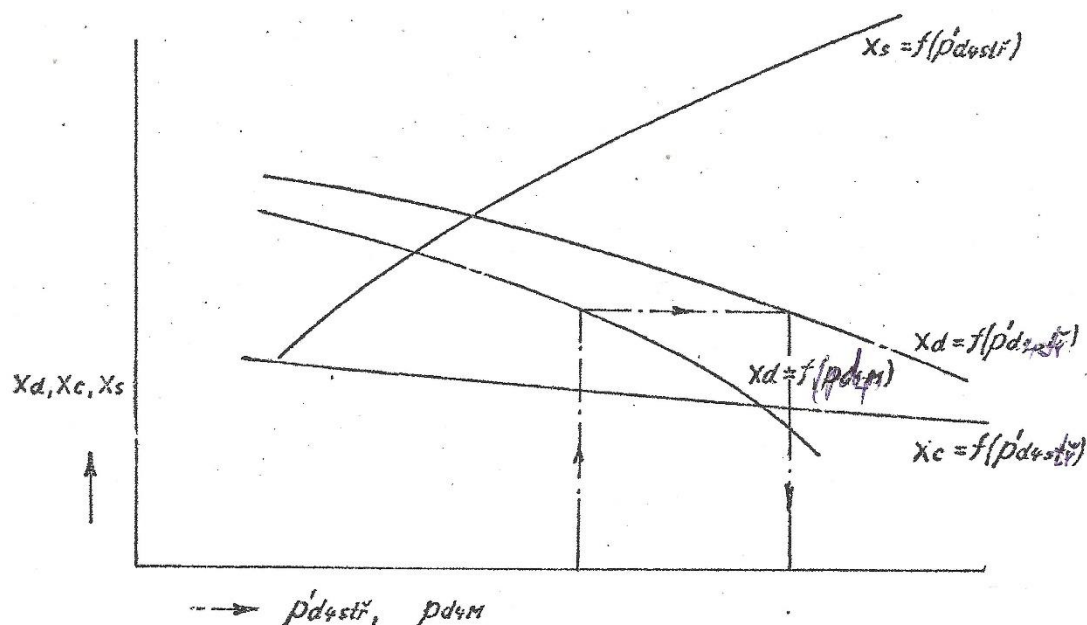
Při kalibraci sond bude $p_{s4} = p_b$

Podmínka, jež platí: $x_d + x_c + x_s = 1$

Skutečný dynamický tlak $p'_{d4stř} = p'_{c4stř} - p_{s4}$

Měřený dynamický tlak $p_{d4m} = p_{c4m} - p_{s4m}$

Výše uvedené vztahy pro x_d , x_c a x_s jsou zakresleny do grafu.



Obr. 11: Závislosti x_d , x_c a x_s na skutečném a měřeném dynamickém tlaku [10]

Pro určení skutečného dynamického tlaku $p'_{d4stř}$ se postupuje následujícím způsobem. Pro vybraný naměřený tlak p_{d4m} určíme hodnotu $x_d = f(p_{d4m})$ z grafu. Na ose y nalezneme námi určenou hodnotu $x_d = f(p_{d4m})$, směrem rovnoběžně s osou x se posouváme, dokud nenarazíme na křivku $x_d = f(p'_{d4stř})$. V místě průsečíku spustíme kolmici a odečteme skutečný tlak $p'_{d4stř}$.

Pro zjištění statického tlaku p_{s4} se postupuje tak, že určíme hodnotu na křivce $x_s = f(p'_{d4stř})$, jež odpovídá skutečné hodnotě dynamického tlaku $p'_{d4stř}$. Podle vztahu níže vypočteme skutečný statický tlak.

$$p_{s4} = p_{s4m} - p'_{d4stř} \cdot x_s$$

Již známý skutečný celkový tlak využijeme i pro výpočet středního celkového tlaku $p'_{c4stř}$. A to z výrazu $p'_{c4stř} = p'_{d4stř} + p_{s4}$. Nebo obdobným způsobem jako u tlaku statického zjištěním hodnoty na křivce $x_c = f(p'_{d4stř})$. Potom lze celkový tlak vyjádřit takto:

$$p'_{c4stř} = p_{c4m} - p'_{d4stř} \cdot x_c$$

Kalibrace sondy nezahrnuje pouze odečet tlaků, ale i výstupních úhlů proudu. Ze vztahů pro vyvážené proteklé množství, uvedených výše, lze vyjádřit skutečnou střední hodnotu výstupního úhlu proudu $\alpha'_{4stř}$.

Sondou naměříme hodnotu α_{4m} . Rozdíl úhlů tedy je $\Delta\alpha = \alpha'_{4stř} - \alpha_{4m}$.

Tento rozdíl je zanesen do kalibračního diagramu v závislosti na skutečném středním dynamickém tlaku $p'_{d4stř}$. Z takto vytvořeného diagramu určíme příslušnou hodnotu $\alpha'_{4stř}$ ze vztahu:

$$\alpha'_{4stř} = \Delta\alpha + \alpha_{4m}$$

Výsledný úhel může nabývat kladných i záporných hodnot.

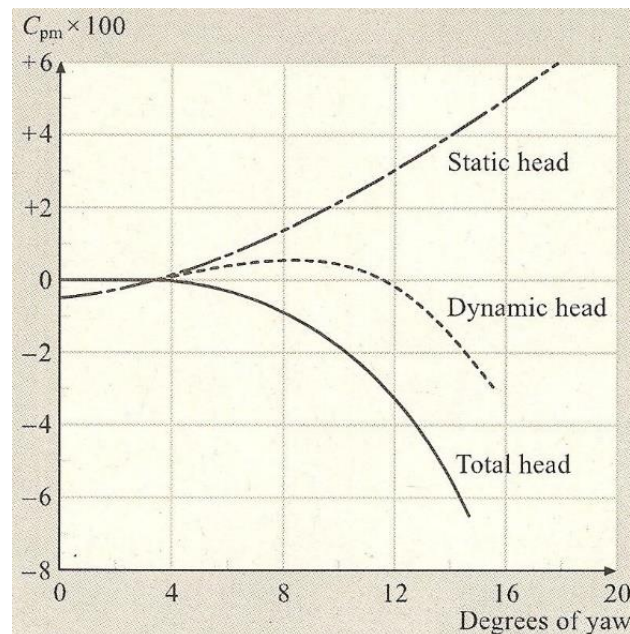
Prvním krokem je správné nastavení měřících zařízení a kvalitní odečet dat. Druhým, ale neméně významným krokem, je vlastní fyzické nastavení sondy do proudu. Pokud by se sonda nenacházela v ideální poloze ke směru toku média (poloze kolmé), získaná data by byla nepřesná. S takovými daty není doporučeno provádět žádné další výpočty, jelikož by byly příliš vzdálené od skutečných.

Pro **optimální nastavení sondy** se používá srovnání naměřených hodnot dvěma sondami, a to sondou kalibrovanou a referenční. Tento vztah

$$C_{pm} = \frac{(p_{dm} - p_{dmref})}{p_{dmref}} \cdot 100$$

Oznamuje velikost chyby v procentech měření dynamického tlaku z důvodu špatného nastavení kalibrované, popř. měřící, sondy.

Referenční sonda je umístěna kolmo na směr proudící tekutiny. **Kalibrovaná sonda** se pohybuje po síti bodů. Sonda postupně provádí posuvy radiálně k ose tunelu a natočení kolem své osy od kladných do záporných úhlů. Rozmezí je definováno uživatelem.



Obr. 12: Velikost chyby odečtu legitimní hodnoty tlaku při odchýlení od kolmého směru proudu [14]

10.2. Kalibrace CTA sondy

Kalibrace těchto sond se provádí přímo ve vzduchových tunelech nebo mobilních kalibračních zařízeních, jež jsou již nyní k dostání na trhu.

Při experimentu bylo využíváno mobilního kalibračního zařízení značky Dantec Dynamics. Ze sondy je opatrně odebrána „vidlička“, která je nasazena do uchycovacího zařízení vlastního kalibračního zařízení s výměnnými dýzami. Tato nová metoda umožňuje, že celá sonda i s „tělem“ nemusí být odpojována a znovu zapojována (se vším zařízením nemusí být hýbáno, což značně šetří čas). „Vidlička“ uchycena v posuvném uchycovacím zařízení je umístěna kolmo na směr proudění a drátek sondy by měl být zarovnaný s výstupním otvorem trysky. Takto ustavená sonda je vystavena proudění o známé rychlosti. Napětí by mělo odpovídat rychlosti, jelikož je její funkcí. Účelem kalibrace je naměření sady dat o 20 – 30 prvcích obsahující napětí a rychlost v rovnoměrně rozloženém rychlostním poli. Určení sady dat bylo stanoveno na základě provedení experimentu vědce Bruuna. Ověřil tím skutečnost, kterou o 4 roky dříve publikoval vědec numerické simulace Swaminathan. Data by měla být sbírána po dobu 10-30 sekund.

Při kalibraci se musí postupovat s velkou důsledností. V prvotních fázích kalibrace největší potíží činila dlouhá reakční doba změny a ustálení tlaků referenční pneumatické sondy, jež kontrolovala rychlost proudění naměřenou CTA sondou. Dlouhá ustálení tlaků byla zapříčiněna dlouhými trubičkami připojenými k tlakovému převodníku a objemem zachyceného vzduchu v měřicím zařízení převodníku. Tento problém byl eliminován vývojem vysoce kvalitních tlakových převodníků. Dnes široce využívané a již zmíněné mobilní dýzové kalibrační stanice mají i své stinné stránky. Hlavní z nich je samotná velikost průřezu dýzy, jelikož jedním ze standardů kalibrace je umístění sondy do nekonečně velkého rovnoměrně rozloženého proudu (= vzduchový tunel se širokým průřezem). Dýza kalibrační stanice Dantec Dynamics způsobuje značnou blokádu toku při ústění, což odchyluje tok média v okolí sondy. Khan provedl řadu experimentů, ze kterých vyplývá, že odchylka rychlosti pro nejširší dýzu o průměru 12,4 mm je přibližně 3 % [12].

10.2.1. Sestavení kalibrační rovnice

Kalibrační rovnice je matematický zápis funkce el. napětí na rychlosti. Do této funkce musí být promítnuty veškeré vlivy, které na sondu v průběhu měření působí. Naměřenými daty se prokládá křivka, nejčastěji metodou nejmenších čtverců, a určuje se výsledná nejistota měření. Velmi důležité bylo, aby samotné kalibrovací zařízení mělo větší přesnost než kalibrované.

K optimalizaci kalibračních konstant, které se ve funkci nacházejí, se využívá metody nejmenších čtverců. Metoda je založena na základě součtu kvadrátu chyb SES, což lze vyjádřit jako rozdíl v napětích $E_R - E_C$.

$$SES = \sum_{i=1}^N (E_R^2 - E_C^2)^2$$

E_R – naměřené kalibrační napětí

E_C – napětí spočtené z vybrané rovnice $E_C = F(U_R)$, kde U_R je naměřená kalibrační rychlost proudění

Uvedený vzorec zjednodušuje postup proložení křivkou pro rovnici funkční závislosti napětí na rychlosti [King, 1914]:

$$E^2 = A + BU^n$$

Metoda nejmenších čtverců SES byla následně použita pro analytickou funkci, ze které se získají optimální hodnoty kalibračních konstant A, B a n.

Za účelem zjištění optimálnosti proložené křivky se využívá metody normalizované směrodatné odchylky ε_u , zapsané takto:

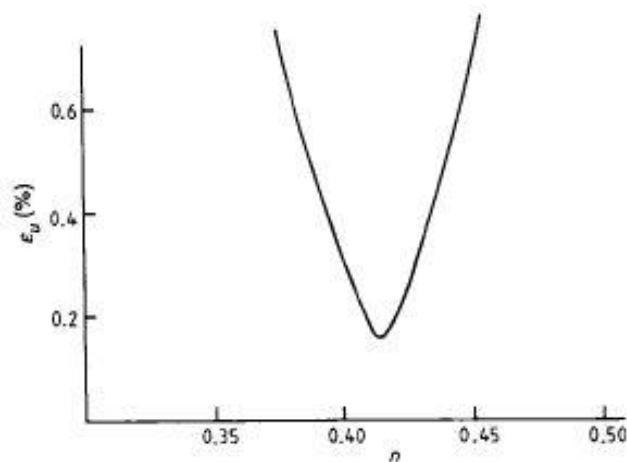
$$\varepsilon_u = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{U_R}{U_C} \right) \right)}$$

U_C – rychlost média spočtená z vybrané rovnice, určuje se jako inverzní funkce již známých kalibračních konstant: $U_C = F^{-1}(E_R)$

V počáteční fázi výzkumu o určování kalibračních konstant A a B se považovalo konstantní $n = 0,5$. Jeho hodnotu 0,5 odhadl King. V roce 1959 Collis a Williams našli funkci, jež lépe kopírovala naměřené body a zpřesnili hodnotu exponentu $n = 0,45$. Jejich funkce byla schopna popsat závislost $E(U)$ v podstatně širším rozmezí pro $Re = 0,02 \div 44$ a bez enormních výkyvů rychlostí. U rychlosti musel být dodržen poměr: $\frac{U_{max}}{U_{min}} = 10 \div 20$.

Od určité doby s exponentem n nebylo nakládáno jako s konstantou, ale jako s proměnnou. Za hodnotu n byla považovaná konkrétní optimální hodnota n_{opt} , která vykazovala nejmenší hodnoty v SES rovnicích. S tímto vyjádřením přišel v roce 1969 van Thinh. To bylo později potvrzeno dalšími významnými vědci 20. století jako Bruun, Tropea, Swaminathan nebo Pitts a McCaffrey.

Změna parametru n od n_{opt} se výrazně projeví na nárůstu normalizované směrodatné odchylky ϵ_u . Zobrazeno na obrázku 13.



Obr. 13: Průběh změny normalizované směrodatné odchylky ϵ_u při změně koeficientu n . [12]

Za středních rychlostí se optimální hodnota n wolframového drátku o průměru $5 \mu m$ se pohybuje v rozmezí $0,4 \div 0,45$. Z obrázku 13 je patrné, že s chybou od optimální hodnoty exponentu n strmě roste nejistota měření.

Probíhaly i pokusy, aby se na kalibrační konstantu A hledělo jako na proměnnou a rovnice bychom řešily pro konstantu B a nyní konstantu n . Taktéž probíhaly pokusy o vyjádření kalibrační konstanty A na napětí E_0 za nulové rychlosti proudu. Tyto pokusy ale vzbudily diskuse, jelikož n by silně záviselo na rychlosti. Toto by značně komplikovalo použití. Proto je doporučeno kalibrační konstantu A považovat za proměnnou, kde $A \approx 0,8 \cdot E_0^2$. Takto můžeme vyřešit rovnice souběžně pro hodnoty A, B i n .

Existují i další možnosti zjišťování optimální křivky jako například princip univerzální funkce (angl.: The Universal-function Principle) ve tvaru $E^2 - E_0^2 = CF(U)$ nebo spline, který je avšak nestabilní za vysokého počtu naměřených bodů. Pro hladší funkci lze využít tzv. kubický spline, kde každý z bodů j je spojen s bodem $j-1$ tenkou, stejnorodou a pružnou křivkou. Kde křivka je kubickou funkcí.

Nejvýznamnější metodou je prokládání body polynomy. Tato metoda je založena na principu převráceného vztahu $E = F(U) \rightarrow U = F^{-1}(E)$. Vyjádřit tímto způsobem závislost je z matematického hlediska korektní. George v roce 1989 zveřejnil polynom ve formě

$$U = A + BE + CE^2 + DE^3 \dots$$

Tento zápis má výhodu pro výpočetní techniku, jelikož rychlost média U lze snadno získat. Naměřenými daty byly proloženy polynomy až 10 řádu. Bylo zjištěno, že polynomy 5. a vyššího řádu vykazují nestabilitu v průběhu.

Přesnost polynomů byla též zkoumána v závislosti na proměnné E^2 za použití metody nejmenších čtverců (angl.: least-square method) u polynomů 2. a 3. řádu [12].

$$U = A + BE^2 + C(E^2)^2$$

$$U = A + BE^2 + C(E^2)^2 + D(E^2)^3$$

10.2.2. Porovnání přesností metod

V rozmezí rychlostí $5 \div 50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ vykazuje největší přesnost metoda Spline. Tato metoda dosahovala o řád lepších normalizovaných směrodatných odchylek ε_u než metody s polynomy a kalibračními koeficienty A, B, n . Nejlepší výsledků bylo dosaženo s počtem intervalů 7 a více a hodnota ε_u dosahuje hodnoty 0,05 %. Velkou nevýhodou této metody však je její implementace do výpočetní techniky. Jedná se o složitou metodu a její vytvoření je časově náročné. Přestože disponuje nejpřesnějšími údaji, využívá se jen ojediněle. Přijatelnějším způsobem při využití výpočetní techniky je práce s polynomy. Nejlepší výsledky vykazují rovnice 4. řádu s proměnnou E a 3. řádu s proměnnou E^2 uvedené nahoře. Tyto metody stejně jako rovnice s kalibračními konstantami, kde se získávají koeficienty A, B, n , dosahují též vysoké přesnosti. Z těchto rovnic mají nejmenší chybu ty, z nichž se koeficienty určují souběžně. Jejich normalizované směrodatné odchylky ε_u jsou v rozmezí 0,15 \div 0,10 % [12].

10.3. Kalibrace odporového teploměru PT100

Metod ke kalibracím teploměrů se v dnešní době používá široké spektrum. Samotná kalibrace se neskládá pouze z naměření dat pomocí těchto metod, ale i samotné vyhodnocení dat, zvolení správné rovnice a hodnot koeficientů.

Smočení teploměru se nejčastěji provádí do kapalin, popřípadě kapalných kovů při tuhnutí. Základní metoda je taková, která pracuje s významnými body látky \rightarrow bodem tuhnutí, bodem varu, či trojným bodem. V těchto bodech nastává přeměna látky, a tudíž jsou přítomny dvě a více skupenství. Hodnoty teplot těchto bodů závisí zejména na tlaku. U většiny látek už jsou dobře známy. V případě trojného bodu vody a jeho správného nastavení víme, že tlak musí odpovídat výšce vodního sloupce rtuti 4,58 mm. Ponořením senzoru do prostředí, které známe a víme, jaké hodnoty by měl teploměr vykazovat, slouží k zpřesňování kalibračních konstant.

Zařízení pro měření při trojném bodě se skládá ze skleněného válce s několika částmi. Oddělená část naplněná vodou. Vstupní trubice se využívá k transportu chladícího média do okolí uzavřené vody. Jako chladícího média se využívá suchého ledu (CO_2) v práškové formě. Chladící medium se ponechá do doby, než se v uzavřené vodě tvoří 5mm vrstva ledu. Následně se medium odejme a do vstupní trubice se vloží teploměr. Jelikož teploměr byl

v pokojové teplotě, uvolněné teplo roztaví led na vnitřní straně nádoby. Tímto je ustanoven trojný bod. Pro zajištění kvalitního tepelného přenosu, prostor mezi teploměrem a oddělenou částí vody s rotujícím ledem je vyplněn alkoholem nebo minerálním olejem. Takto získanou směs je možno uchovat po dobu několika měsíců a stále vykazuje přesné výsledky.

U kalibrační metody, kde se využívá bod tuhnutí vody, se pracuje se směsí vody a ledu. Přebytečná voda musí být periodicky odstraňována a stejně tak musí být dodáván led. Při nedodržení by se voda v nejnižší části mohla pohybovat až kolem 4 °C.

K referenčnímu měřicímu zařízení se nejčastěji připojují měděné dráty, které vykazují nejlepší tepelné vlastnosti. Tyto dráty jsou vnořeny do trubice se rtutí. Kolem trubice se pohybuje směs vody a ledu. Nejistota za pomoci tohoto materiálu ponořeného minimálně do 6 palců je pouze 0,1 °F. Rozdíly v barometrickém tlaku mezi 96,5 a 105 kPa mají na posunutí bodu tuhnutí minimální vliv. Vlivy, které jsou schopny ovlivnit přesnost měření je použití pitné vody namísto destilované, chyba do 0,01 °C a v případě, že by se dostala voda do kontaktu s měděnými dráty. Druhé zmíněné by mohlo narušit napětí referenčního termočlánku. Z tohoto důvodu jsou dráty opatřeny izolací.

Na obdobném principu fungují i metody jiných bodů tuhnutí. Z materiálů se používá zinek a cín. Tavný materiál se roztaví. V blízkosti se nachází i trubice s kalibrovaným teploměrem, který však nesmí přijít do styku přímo s roztaveným materiálem. V době látkové přeměny materiálu je možno provádět odečítání dat z kalibrovaného zařízení. Tato doba se u Zn pohybuje do 300 minut. Během této doby je odpor neměnný nebo pouze zanedbatelně.

Velmi rozšířená je metoda s bodem varu vody. Nevýhodou této metody je vysoký vliv barometrického tlaku na polohu tohoto bodu. Velkou výhodou však oproti předchozím zmíněným metodám je možnost získávání dat v neomezeném čase, jelikož jsme schopni vodu neustále přidávat a zajišťovat její přeměnu. [2]

10.3.1. Interpolační metody

Interpolačních metod se používá prakticky ve všech oborech, kde je nutné vyplnit či odhadnout průběhy neúplných dat. Neúplnými daty jsou i taková data, kdy máme určenou vzorkovací frekvenci. Aby data kontinuálně navazovala, a tím byla považována za úplná data, musela by se vzorkovací frekvence limitně přibližovat nekonečnu.

Interpolační metoda se skládá ze 4 částí.

- a) Graf závislosti rozdílu referenčního napětí a napětí kalibrovaného zařízení na napětí kalibrovaného zařízení a porovnání s referenčními tabulkovými hodnotami
- b) Určení a aplikace obálky (zóny) nejistoty
- c) Použití metody nejmenších čtverců (angl. least-square method)
- d) Počet naměřených prvků alespoň 2 krát (st. polynomu + 1)

Za využití interpolační metody jsme schopni určit vztah mezi el. napětím a teplotou. V určitých intervalech jsme schopni tuto závislost popsat matematickým zápisem. Například v rozmezí 630 až 1064 °C lze použít pouze rovnici $E = a + bT + cT^2$. Konstanty a, b, c jsme schopni určit pomocí metod bodů tuhnutí zlata, stříbra nebo antimonu.

V případě, že nejsme schopni nalézt křivku závislosti $E(T)$, resp. $T(E)$, použijeme metodu a). Získané hodnoty porovnáváme s referenčními tabulkovými hodnotami. Na ose x je zaznamenán průběh napětí E , na ose y rozdíl napětí referenčního a naměřeného, $E_{\text{ref}} - E(E)$. Tímto způsobem jsme schopni provést odhad funkce s již velmi nízkými stupni polynomů.

Druhou zmíněnou metodou, částí b), je odstranění výstředních dat, která svou polohou výrazně ovlivňují prokládanou křivku. Křivka by totiž nepřesně kopírovala tvar legitimních bodů. Velikost obálky nejistoty se volí tak, aby kalibrovaná data poskytovala co nejpřesnější sadu dat. Vybranými daty je proložena křivka, která má největší možnou vypovídající hodnotu.

Třetí část, metoda nejmenších čtverců, úspěšně minimalizuje nejistotu měření. Zde je sada kompetentních dat vybírána na základě relevantnosti každého prvku za pomoci statistiky a zákonů pravděpodobnosti. Postupně se body prokládají polynomy rostoucích stupňů. Vybere se takový, který jako první splní podmínku obálky nejistoty. Nejčastěji se pracuje se třetím stupněm. Ten je schopen již kvalitně popsat bodovou závislost a nepřilíš zatěžuje výpočtový aparát. Využitím metody a) a získáním druhé mocniny rozdílu ΔE^2 zredukujeme nejistotu na polovinu maximální hodnoty velikosti obálky. U metody nejmenších čtverců hraje zásadní roli i počet naměřených dat a rozsah teplot. Data rovněž ovlivňují všeobecný tvar obálky nejistoty a velikost stupně polynomu.

Podmínka počtu naměřených dat nás přivádí k bodu d). Zde je kladen požadavek na minimální počet konkrétních kalibračních bodů, a to $2 \cdot (\text{st. polynomu} + 1)$. Násobek dvou je zaveden na základě numerické analýzy. Za konkrétní kalibrační bod je považován, který se od ostatních liší svou teplotou o více jak 10 % mezi teplotou nejnižší a nejvyšší v daném měřicím intervalu.

Pokud není možno sestavit polynom do 4. stupně včetně, který by kvalitně kopíroval průběh závislosti, je potřeba zvětšit obálku nejistoty, to znamená aplikovat celou interpolační metodu znovu.

Tuto interpolační metodu lze použít nejen pro kalibraci teplotních senzorů, ale i např. kalibraci tlakových a proudových senzorů.

10.3.2. Vyhodnocovací metody hodnot teploty z kalibračních dat

Důležité je správné nastavení teplotních senzorů a současné naměření správných výstupních teplot z teploměru. Z účelem interpretace dat lze využít několika metod. V praxi se používají 4 druhy metod, které skýtají jak výhody, tak nevýhody. Nejvíce se liší svými pracnostmi.

V případě první metody se k teplotě dostáváme ze vztahu $E = f(T)$. Teplotu zjišťujeme s využitím iterací, jejichž výstupem je hodnota E_i . Pokud je rozdíl E a E_i dostatečně malý, je poslední teplota považována za správnou.

Pro druhou metodu se pracuje se převrácenou hodnotou vztahu $E = f(T)$, tedy $T = F(E)$. Nevýhodou této metody je její výrazná nepřesnost na dlouhých intervalech. Nepřesnost je též způsobena nezapočtením charakteristik termočlásku/senzoru, které se v inverzní funkci mohou výrazně lišit.

Třetí metoda je svým principem první. Je obohacena o srovnání s tabulkovými jednotkami. Hledá se matematická závislost mezi $\Delta E (= E_{Ref} - E_{Sensor})$ a E_{Sensor} . V následujícím kroku se k ΔE připočte E_{Sensor} . Tímto získáme E_{Ref} , $E_{Ref} = E$. Iteracemi se opět, jako u metody 1, dostáváme k teplotě T .

Poslední metoda je výpočetně náročnější než předchozí metody. Je založena na podobném principu jako metoda druhá – do řešení jsou promítnuty i charakteristiky senzoru. Kalibrovaná data jsou přímo prokládána matematickou závislostí $T = f(E_{Sensor})$. Takto získané polynomy jsou velmi často vyššího stupně než předchozí polynomy u metody 3. V dnešní době výkonných počítačů se ale jedná o zanedbatelný problém [2].

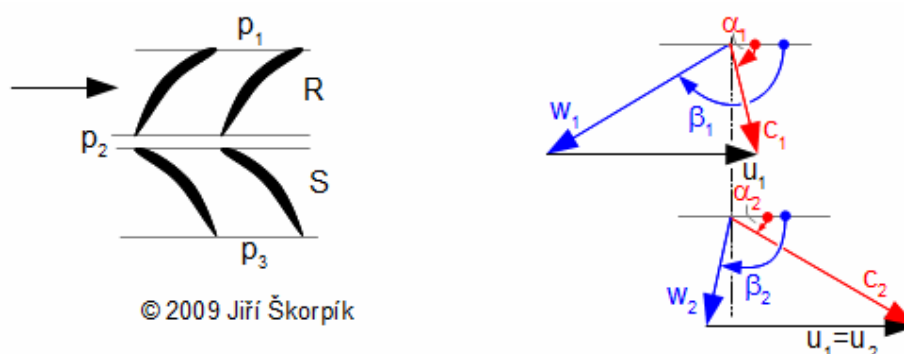
11. Praktická část

11.1. Výpočet proudových parametrů lopatkového kola

11.1.1. Příprava úkolu 1

K měření bylo využíváno pneumatický sond. Referenční Pitotovy sondy umístěné do držáku u výstupu z kola. Měřicí Prandtlova sonda byla uchycena do čelistí traverzéro (zařízení, jež pohybuje se sondou v osách x , y , z). „Nos“ sondy byl umístěn do blízkosti středu konstrukce obíhajícího kola tak, aby měření bylo zahájeno na úrovni paty lopatky. Pozice sondy byla pečlivě zvolena tak, aby proud z tunelu přitékal kolmo na „nos“ sondy. Nastavení proběhlo za pomoci úhelníku, digitální vodováhy a nivelačního zařízení. V konkrétním místě došlo k odebrání 350 vzorků celkových a statických tlaků p_{c1} a p_{s1} a teplot T_{c1} a T_{s1} . Od paty ke špičce lopatky bylo sondou pohybováno s krokem 5 mm. Odečet dat byl proveden jak na vstupu do turbíny, tak na jejím výstupu. Z těchto dat byly vypočteny proudové parametry kola.

Zkoumalo se, jakým způsobem se mění tlak, jak celkový, tak statický, a to po délce lopatky. Stejně tak jakých absolutních i relativních rychlostí bylo dosahováno, na úhlu náběhu a výběhu z kola. Všechna tato chování byla vyhodnocována po délce lopatky. K vyhodnocování bylo použito softwaru Matlab R2016a, který se vyznačuje svou rychlostí při práci s velkým množstvím dat a nabízí širokou škálu výpočetních metod. Takto jsme analyticky popsali zkoušenou turbínku. Provádí se, aby bylo známo, jakým způsobem se oběžné kolo chová a jaké výsledky bude poskytovat.



Obr. 14: Ilustrační obrázek rychlostních trojúhelníků při vstupu a výstupu z lopatkové mříže [10]

11.1.2. Postup výpočtu

Rychlostní trojúhelník na vstupu lze vypočítat, pokud známe **směr** a **velikost** absolutního proudu w_1 , obvodovou rychlost u , hodnotu celkového a statického tlaku p_{c1} a p_{s1} a celkovou teplotu T_{c1} protékajícího média, zde vzduch. Vzduch směřuje kolmo na oběžné kolo.

Celkové a statické vstupní a výstupní tlaky p_{c1} , p_{s1} a p_{c3} a p_{s3} jsou měřeny Prandtlovo sondou a referenční celkové tlaky na vstupu a výstupu Pitotovo sondou. Celková vstupní teplota T_{c1} byla měřena v prostředí tunelu s dvojitým stíněním odporovým teploměrem PT100.

Absolutní rychlost na vstupu w_1 vypočítáme takto

$$w_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot r \cdot T_{c1} \left[1 - \left(\frac{p_{s1}}{p_{c1}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

kde konstanty k jsou hodnoty κ , které pro vzduch, jakožto dvouatomový plyn nabývá 1,4, konstanta r je plynová konstanta, pro vzduch rovna $287,1 \frac{J}{kg \cdot K}$.

Obvodová rychlost u , byla určena vzorcem

$$u = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30}$$

kde R je referenční poloměr oběžného kola v metrech a n jsou otáčky za minutu, v našem případě 6600.

Relativní rychlost na vstupu w_2 dopočteme z Pythagorovy věty

$$w_2 = \sqrt{w_1^2 + u^2}$$

Ze stejného trojúhelníku si lze vyjádřit úhel proudu na vstupu do oběžného kola

$$\tan \alpha_2 = \frac{u}{w_1}$$

Úhel náběhu i proudu na list lopatky lze vyjádřit rozdílem $\beta - \alpha_2$, kde β je úhel natočení lopatky. Průběh úhlu natočení lopatky je popsán kvadratickou funkcí

$$\beta(R) = -0,0015602 \cdot R^2 + 0,6065 \cdot R + 18,183$$

Rychlostní trojúhelník na výstupu byl vypočten opět za využití již známých hodnot celkového a statického výstupního tlaku p_{c3} a p_{s3} a celkové teploty T_{c3} na výstupu. Teplotu T_{c2} zatím neznáme. Docílí se jí matematickými úpravami adiabat.

V první části je již vyjádřena obvodová rychlost u . Statický tlak p_{s3} je roven tlaku barometrickému.

Relativní rychlost w_2 lze docílit dvěma způsoby. Prvním, geometrickým, již zmíněným a druhým, komplexnějším, vyjádřen z termodynamiky.

$$w_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot r \cdot T_{c2} \left[1 - \left(\frac{p_{s2}}{p_{c2}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

Pro kompletní dosazení bylo potřeba vyjádřit teplotu T_{c2} a oba tlaky p_{c2} a p_{s2} .

Celkovou teplotu T_{c2} na vstupu do lopatkové mříže určíme ze vztahu

$$T_{c2} = T_{c1} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot R \cdot T_{c1}} \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

Celkový tlak p_{c2} na vstupu do lopatkové mříže lze vyjádřit takto

$$p_{c2} = p_{c1} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot R \cdot T_{c1}} \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

Statický tlak na vstupu do mříže p_{s2} je shodný s naměřeným tlakem p_{s1} .

Pro výpočet absolutní rychlosti na výstupu z lopatkové mříže w_3 bylo potřeba zjistit hodnotu ztrátového součinitele ξ .

$$\xi = \frac{p_{c2} - p_{c3}}{\frac{\rho_2^2}{2}}$$

kde ρ je hustota vzduchu při vstupu do turbíny.

Hustota ρ lze vyjádřit ze stavové rovnice:

$$p \cdot v = r \cdot T$$

$$\frac{p}{\rho} = r \cdot T \Rightarrow \rho = \frac{p}{r \cdot T}$$

Hustotu ρ_2 lze zapsat jako

$$\rho_2 = \frac{p_{s2}}{r \cdot T_{s2}} = \frac{p_{s1}}{r \cdot T_{s1}}$$

Absolutní rychlost na výstupu z lopatkové mříže w_3 lze vypočítat několika způsoby na základě znalosti dosud zjištěných informací. Nejpřesnější je vycházet z prvotních, naměřených, dat. Z tohoto důvodu byl použit tento vzorec

$$w_3 = \sqrt{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right]}$$

$$\sqrt{1 - \frac{p_b}{p \left(1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right)^{\frac{k}{k-1}} - \xi \cdot p_{s1} \frac{k}{k-1} \left\{ \left(\frac{p_{c1}}{p_{s1}} \right)^{\frac{k}{k-1}} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right] - 1 \right\}}}$$

Celkový tlak na výstupu z kola p_{c4} byl spočten podle následujícího vzorce.

$$p_{c4} = \left\{ w_3^2 \cdot (\cos \beta)^2 \left[1 + \left(\frac{\pi R n}{30 \cdot w_3 \cdot \cos \beta} - \tan \beta \right)^2 \right] \frac{(k-1) p_{c3}^{\frac{k-1}{k}}}{2 \cdot k \cdot R \left[T_{c1} + \frac{(k-1)}{2 \cdot k \cdot R} \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2 \right]} + p_b^{\frac{k-1}{k}} \right\}^{\frac{k}{k-1}}$$

Celková teplota na výstupu z oběžného kola T_{c4} se dá vyjádřit opět více způsoby, zde je uveden ten, jež byl využit pro výpočet v našem experimentu.

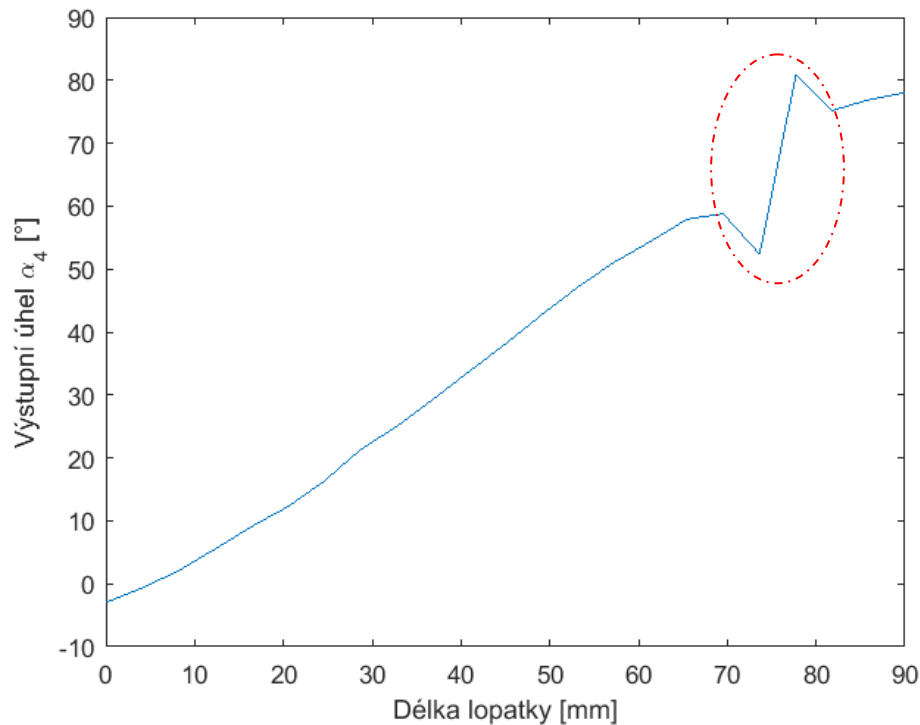
$$T_{c4} = T_{c2} \left(\frac{p_{c4}}{p_{c3}} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Posledním vyhodnocovaným parametrem je výstupní úhel α_4 . Tento úhel lze vyjádřit v závislosti na prvotních parametrech p_{c1} a T_{c1} (vzorec zmenšen z hlediska přehlednosti). Pro výpočet byl využit druhý vzorec, který je však náchylnější k chybě, jelikož se pracuje s mezivýsledky.

$$\alpha_4 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi R n}{30 \cdot \cos \beta \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} r \cdot T_{c1} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right]}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{p_b}{\left[p_{c1} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right]^{\frac{k-1}{k}} - \xi \cdot p_{s1}^{\frac{k}{k-1}} \left(\frac{p_{c1}}{p_{s1}} \right)^{\frac{k}{k-1}} \left[1 + \frac{(k-1) \left(\frac{\pi R n}{30} \right)^2}{2 \cdot k \cdot r \cdot T_{c1}} \right] - 1} \right]^{\frac{k-1}{k}}}}}} - \tan \beta \right\}$$

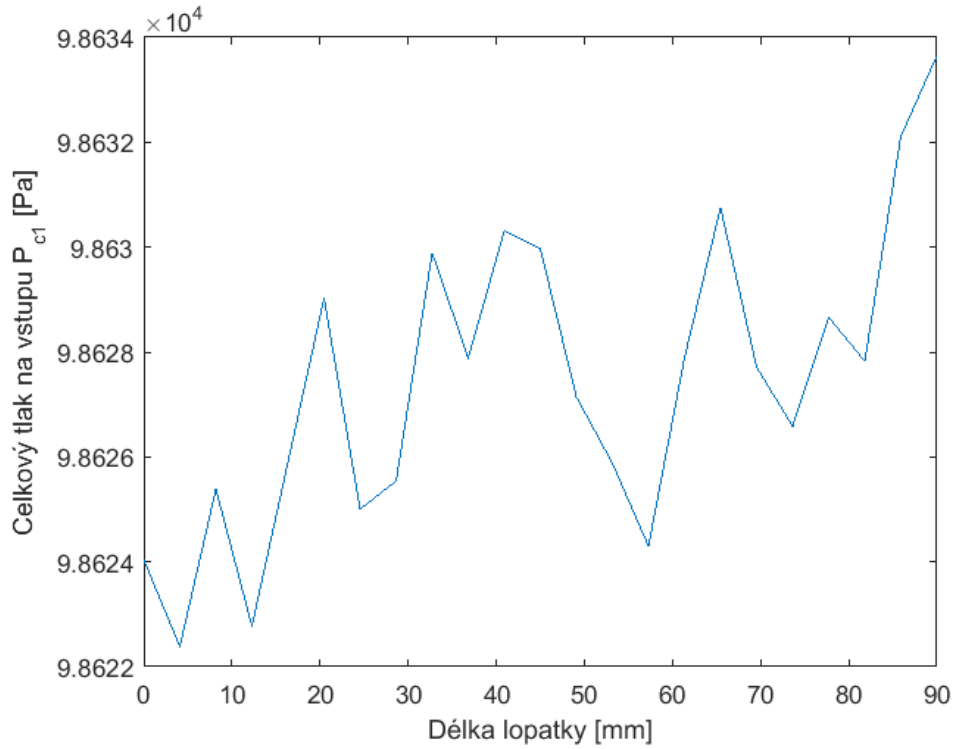
$$\alpha_4 = \tan^{-1} \left(\frac{u}{w_3 \cdot \cos \beta} - \tan \beta \right)$$

11.1.3. Výsledky měření

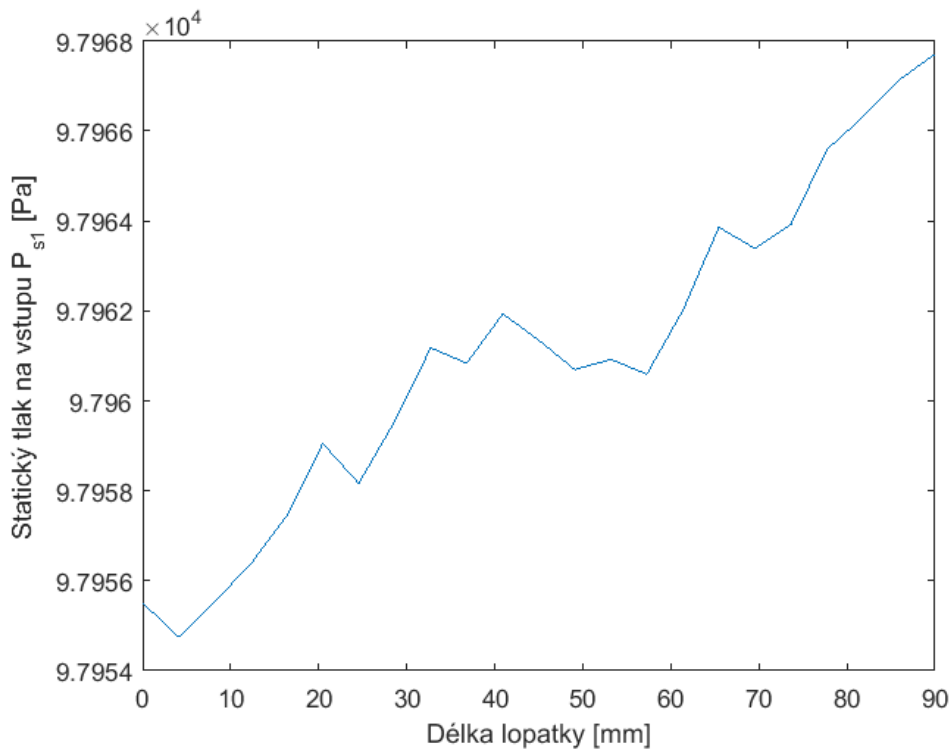


Obr. 15: Graf výstupního úhlu α_4 po délce lopatky

Výstupní úhel po délce lopatky rovnoměrně rostl. Vzniklý zub je následkem postavení sondy mezi koncem lopatky a hranou oběžného kola. Vzduch zde byl pravděpodobně nepravidelně zahnutý. Můžeme říci, že výstupní úhel se pohyboval v rozmezí -3° až 78° . Korektním přístupem by data v místě zubu a za ním měla být označena za nespolehlivá. Adekvátně tedy může být řečeno, že do vzdálenosti 65 mm od paty lopatky, rostl výstupní úhel o cca 58° . Z toho plyne nárůst přibližně $4,5^\circ$ na každých 5 mm.

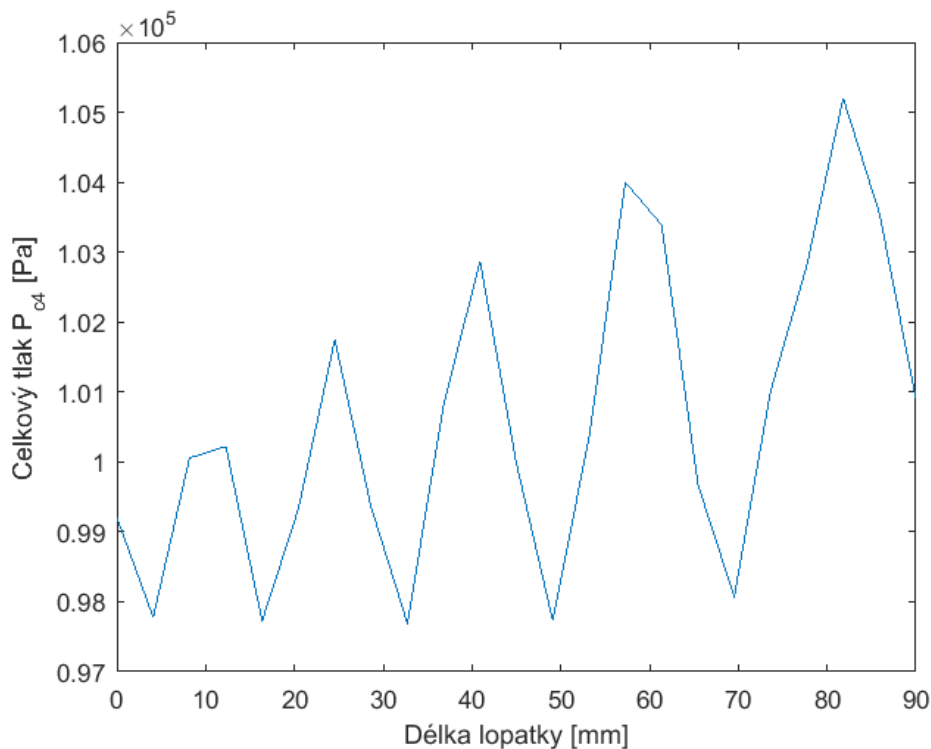


Obr. 16: Průběh vstupního celkového tlaku P_{c1} po délce lopatky



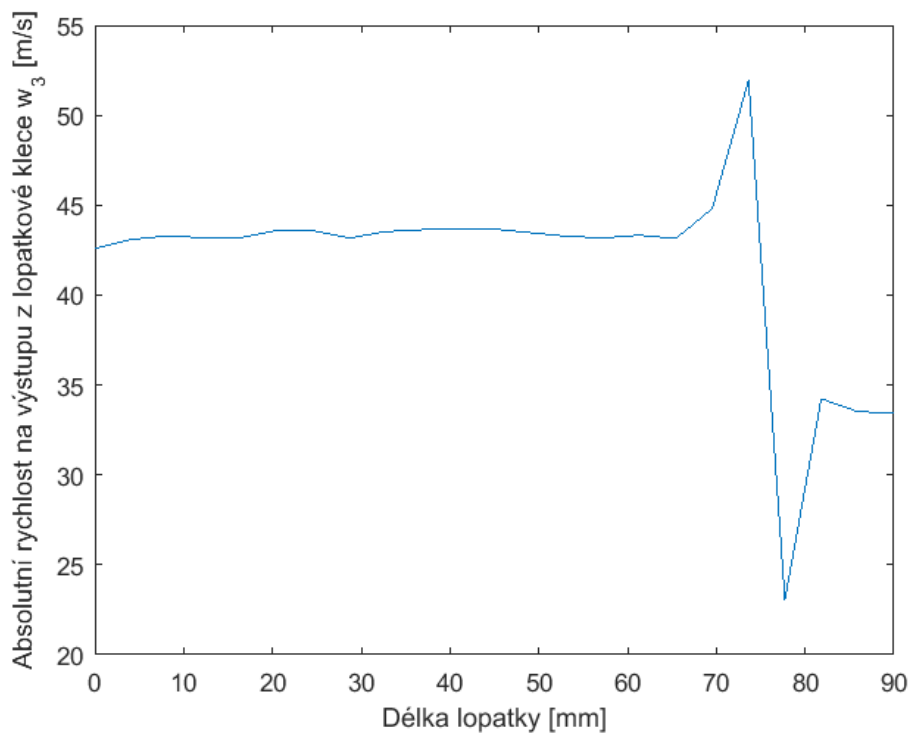
Obr. 17: Chování vstupního statického tlaku P_{s1} po délce lopatky

Zatímco celkový tlak prakticky po celé délce kolísá, statický tlak neustále roste. Z toho plyne, že dynamický tlak je velmi proměnný.



Obr. 18: Průběh výstupního celkového tlaku P_{tot} po délce lopatky

Celkový tlak na výstupu je ve srovnání s celkovým vstupním tlakem vyšší až o 6 kPa. Průběh tlaku za oběžným kolem je kolísavý. Vrací se vždy ke stejné minimální hodnotě. Vrcholové body s rostoucí vzdáleností od paty též rostou.



Obr. 19: Průběh absolutní rychlosti na výstupu z oběžného kola po délce lopatky

Absolutní rychlost w_3 byla do problematického bodu konstantní. Zde si můžeme všimnout analogie s obrázkem 15. Takovéto chování bylo u hrany oběžného kola očekáváno a utvrzuje správnost postupu při měření dat.

11.2. Kalibrace Prandtlovy sondy – v jednom směru, v síti

11.2.1. Příprava úkolu 2

Kalibrace sondy se provádí k optimálnímu nastavení sondy do proudu. Během této operace byla turbínka z hrdla tunelu odebrána. Sonda byla uchycena do rotační hlavy traverzéro. Traverzér je schopen sondou natáčet kolem její osy a v rovině vodorovné.

V první části úkolu byla Prandtlova sonda rotována. Úhel rotace α byl v rozmezí -90° až 90° . Úkolem bylo zjištění optimálního úhlu náběhu proudu na „nos“ sondy. Druhý úkol byl velmi podobný s tím, že bylo sondou pohybováno ve dvou směrech. Úhel α , který kontroloval otáčení kolem osy a úhel ε , který natáčel sondy ve vodorovné rovině, byly nastaveny v rozmezí -20° až 20° . Síť byla sestavena ze 441 prvků na poli 21×21 . Cílem druhého úkolu bylo optimální nastavení úhlů α a ε . U obou případů byla nastavena rychlost otáček na 2000 ot/min a jednalo se o statickou kalibraci. Referenční sonda byla jiná, již kalibrovaná, Prandtlova sonda.

11.2.2. Postup výpočtu

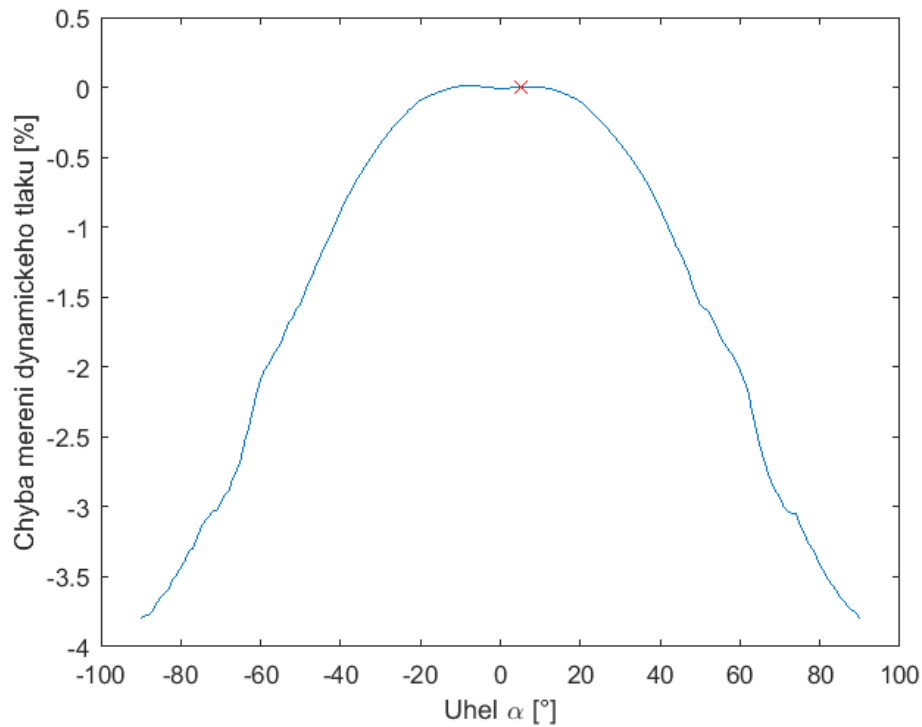
Z naměřených statických a celkových tlaků byla vyjádřena dynamická složka. Dynamické složky kalibrované a referenční sondy byly porovnávány dle vztahu

$$C_{pm} = \frac{(p_{dm} - p_{dmref})}{p_{dmref}} \cdot 100,$$

z čehož jsme určili chybový koeficient C_{pm} .

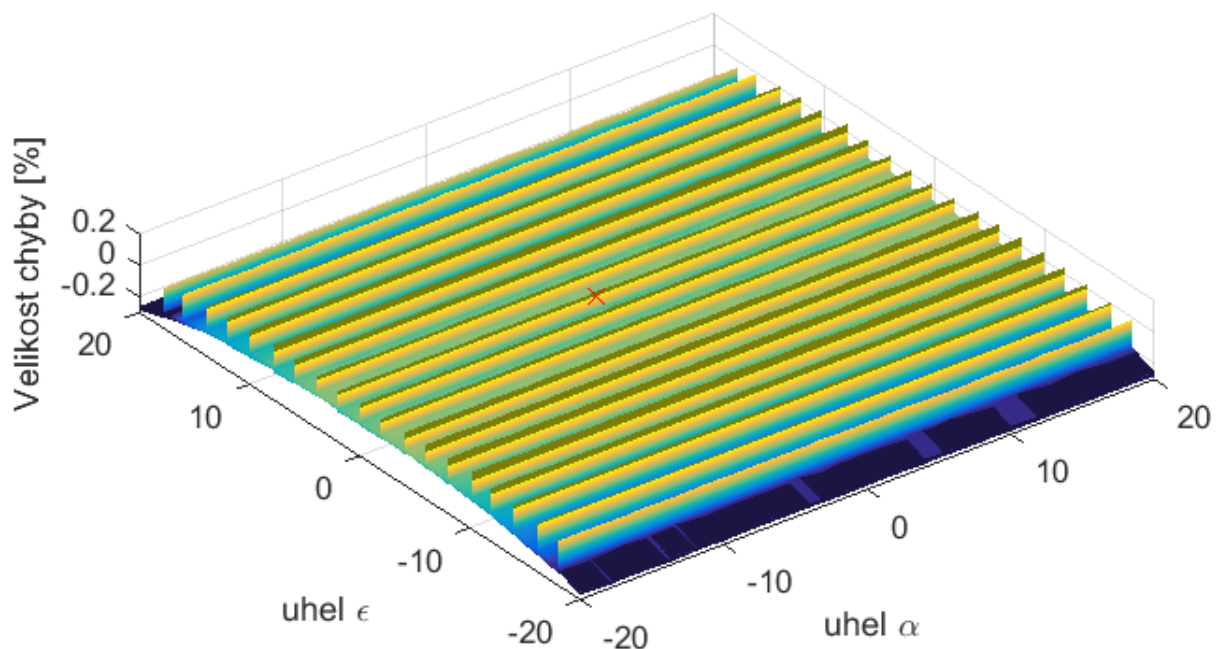
Byla snaha o nalezení takového koeficientu C_{pm} , který se svou hodnotou blíží k nule. V případě, že se chybový koeficient C_{pm} rovná nule, dynamické tlaky kalibrované a referenční sondy jsou shodné. To značí optimální úhel natočení.

11.2.3. Výsledky měření



Obr. 20: Rozdíl dynamických tlaků v závislosti na úhlu α . Vyznačení optimálního natočení

V rovinné kalibraci v rozmezí úhlu α -90° až 90° byl nalezen optimální úhel roven $4,98^\circ$.



Obr. 21: Velikost chyby u dvourovinné kalibrace. Určení optimálního natočení pro úhel α i ϵ

V obrázku 21 si lze všimnout, že po kroku natočení ve vodorovné rovině vznikají plošky přibližně stejných průběhů po celé délce sledovaného úhlu α .

Ideální natočení pro kalibrovanou sondu je kdy $\alpha = -1,98^\circ$ a $\varepsilon = 1,96^\circ$.

11.3. Měření metodou HWA a určení frekvence turbíny

11.3.1. Příprava úkolu 3

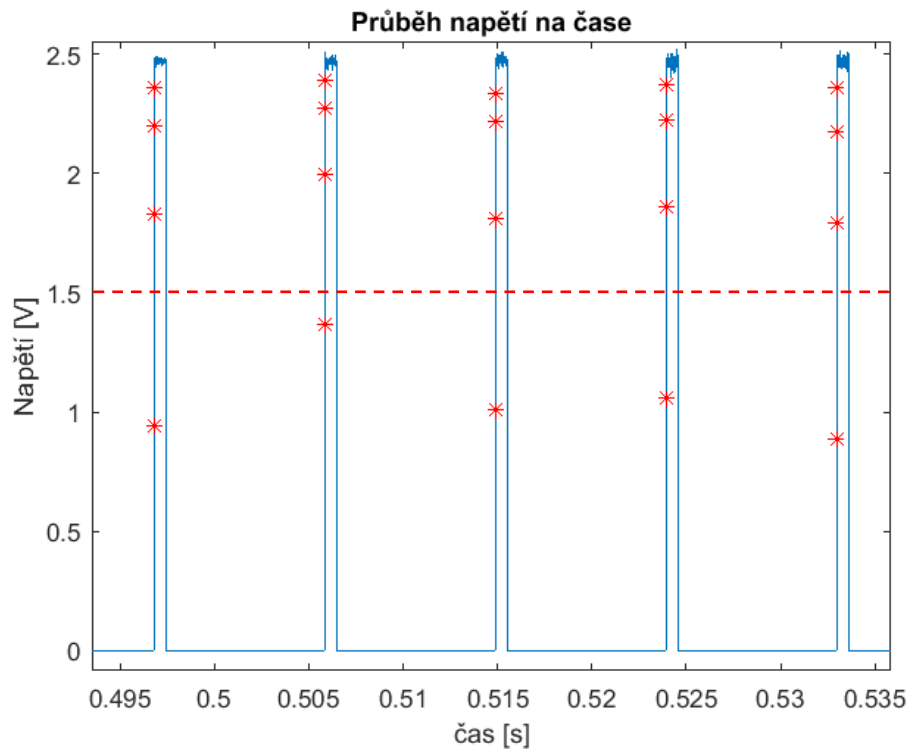
Při tomto měření jsme používali drátkové sondy od Dantec Dynamics 55P11. Tyto sondy jsou schopny zachytit i vysokofrekvenční rychlostní výchylky. Sonda byla nejprve kalibrována v malém přenosném vzduchovém tunelu s výměnnými nastavci pro určité spektrum rychlostí. Takto kalibrovaná sonda byla uchycena pomocí nastavce tak, aby hroty „vidličky“ směřovaly proti směru proudění. Naměřená data obsahovala údaje o čase, napětí, teplotě a rychlosti. Cílem měření bylo zjištění velikosti lopatkové frekvence. Výpočet frekvence slouží k rychlému ověření periodicity signálu, kde by se tento jev v případě lopatkového kola měl vyskytovat. Zjistíme si tedy lopatkovou frekvenci. Z lopatkové frekvence byla vydělením počtem lopatek vypočtena otáčková frekvence kola. Frekvence sloužila k přesnému výpočtu střední rychlosti toku média.

11.3.2. Postup výpočtu

Pracovalo se s maticemi času, napětí a rychlosti. Průběh el. napětí bylo nutné vyhladit, aby napětí kolem nulové hodnoty odpovídalo teoretickému průběhu. Proto hodnoty kolem nuly byly pozměněny na nulu. Z dat byly vybrány takové body, které se nacházely na náběžné straně periodicky se opakujících špiček. Dalším krokem bylo provedení interpolace pro zjištění časů, které odpovídaly hodnotám napětí při 1,5 V. Časové úseky mezi sousedními body na náběžných hranách značily délku periody. Převrácenou hodnotou byly získány velikosti frekvencí. Z nich byla vyhodnocena průměrná frekvence.

Při vyhodnocování rychlosti byla využita pozice dat nejlépe vypovídajících časových údajů na náběžných hranách. Na každé náběžné hraně bylo potřeba znát ten nejlépe vypovídající časový údaj. Řetězec rychlostí byl podle rychlostních korespondujících bodů k časovým roztržen do intervalů. Každý interval obsahoval celou skupinu rychlostí. Rozměry intervalů, až na poslední, si odpovídaly, tudíž nebylo nutné jejich délku redukovat. Poslední interval byl eliminován z důvodu nedostatku naměřených prvků. Korespondující prvky všech intervalů byly zprůměrovány do nového intervalu. Nově vzniklý interval byl opět zprůměrován. Takovýmto způsobem byla zjištěna požadovaná střední rychlost.

11.3.3. Výsledky měření



Obr. 22: Periodický průběh napětí v závislosti na čase

Byla vypočtena časová vzdálenost mezi náběžnými hranami při zvoleném napětí 1,5 V a následně i její převrácená hodnota. Zprůměrovaná hodnota lopatkových frekvencí měla hodnotu 110,3246 Hz, což je přibližně 6620 ot./min.

Střední rychlost proudu média v průběhu času činila 33,0781 m/s.

11.4. Kalibrace 3-otvorové sondy a vyhodnocení kalibračních konstant

11.4.1. Příprava úkolu 4

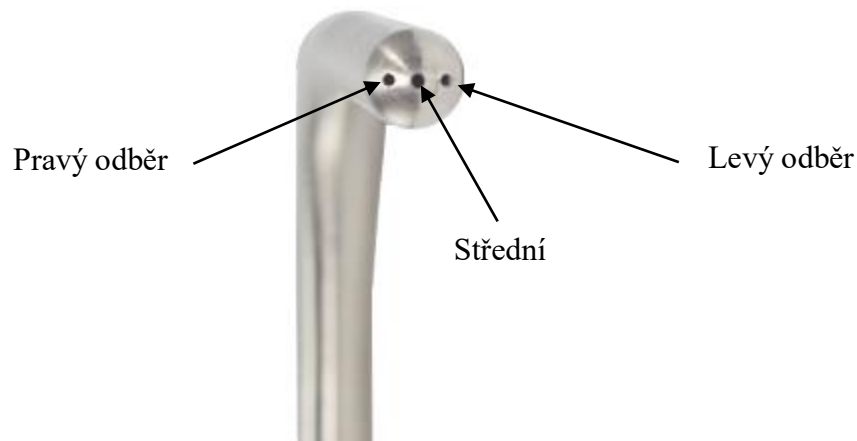
Kalibrace ve známém proudu³ je nutnou podmínkou pro určení kalibračních konstant. Kalibrační konstanty jsou dosazeny do kalibračních rovnic, které dávají do vztahu proudové parametry a měřené tlaky. Celkový a statický tlak se vyjádří v závislosti na úhlu natočení. V našem případě rotace sondy kolem své osy pouze na jednom úhlu, a to α . Při natáčení do více směrů by mohly být 2 až 3. Grafy proložíme regresní křivkou, čímž si vyjádříme analytické závislosti tlaků na úhlu α . S takto kalibrovanou sondou jsme schopni měřit v obecném proudu. Při takovémto měření sonda zachytí tlaky na odběrech. Obecně se nejednalo ani o statický, ani celkový tlak. V tuto chvíli bylo využito kalibračních rovnic, do kterých by se dosadily naměřené obecné tlaky. Zpětně se takto získají úhly natočení, v našem případě úhel α , celkový a statický tlak, pole rychlostí či velikosti vektorů rychlosti ve složkách.

³ Proud, u něhož známe veškeré parametry. Těmi mohou být celkový a statický (dynamický) tlak, velikost vektoru rychlosti ve složkách, či absolutní úhel a směr náběhu.

Měření proběhlo ve dvou variantách. U první varianty probíhalo měření s upevněným oběžným kolem. Tlaky byly odečítány za lopatkovou mříží. U druhé varianty bylo hrdlo tunelu nezatíženo konstrukcí kola a tlaky byly odečítány přímo na výstupu proudu z tunelu.

11.4.2. Postup výpočtu

Pro naši 3-otvorovou sondu byly vyšetřovány koeficienty pro celkový a statický tlak a úhel natočení α . Hledaly se průběhy těchto tlaků v závislosti na úhlu α .



Obr. 23: Ilustrační obrázek 3-otvorové sondy [20]

Při kalibraci bylo využito referenční Prandtlovy sondy, která snímala celkové a statické tlaky. Hodnoty tlaků byly využity pro výpočet kalibračních koeficientů. Střední odběr byl označován standardně p_1 , levý jako p_2 a pravý jako p_3 . Sondou bylo natáčeno kolem středové osy v rozmezí úhlů -90° až 90° . Kalibrační koeficienty byly vypočteny podle následujících vzorců:

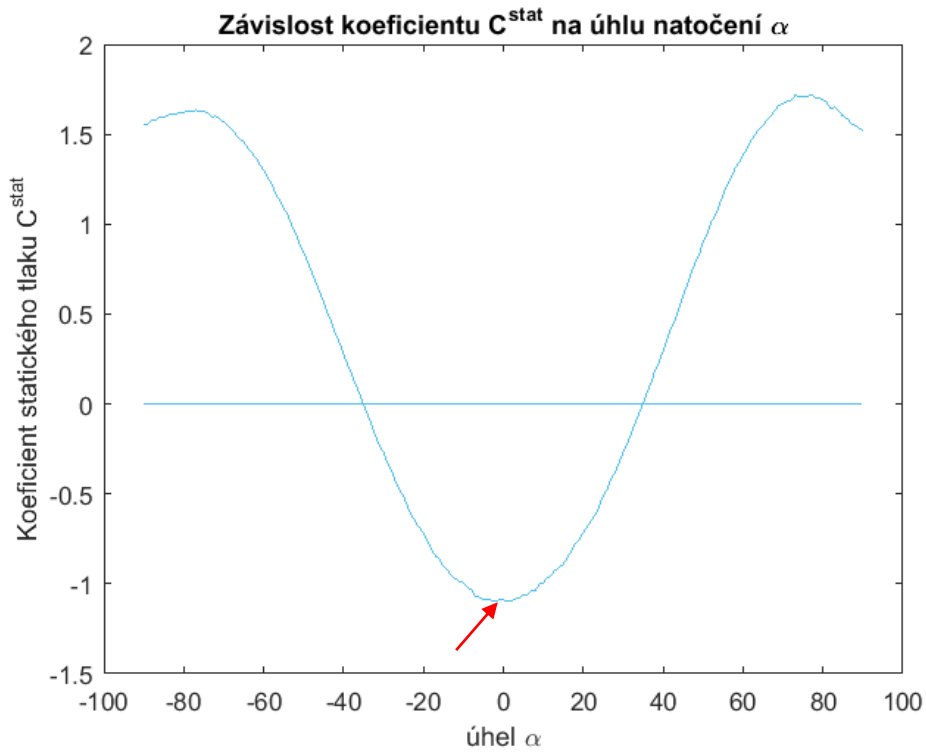
$$C_p^{STAT} = \frac{p_1 - p_S}{p_1 - p}$$

$$C_p^{CELK} = \frac{p_1 - p_C}{p_1 - p}$$

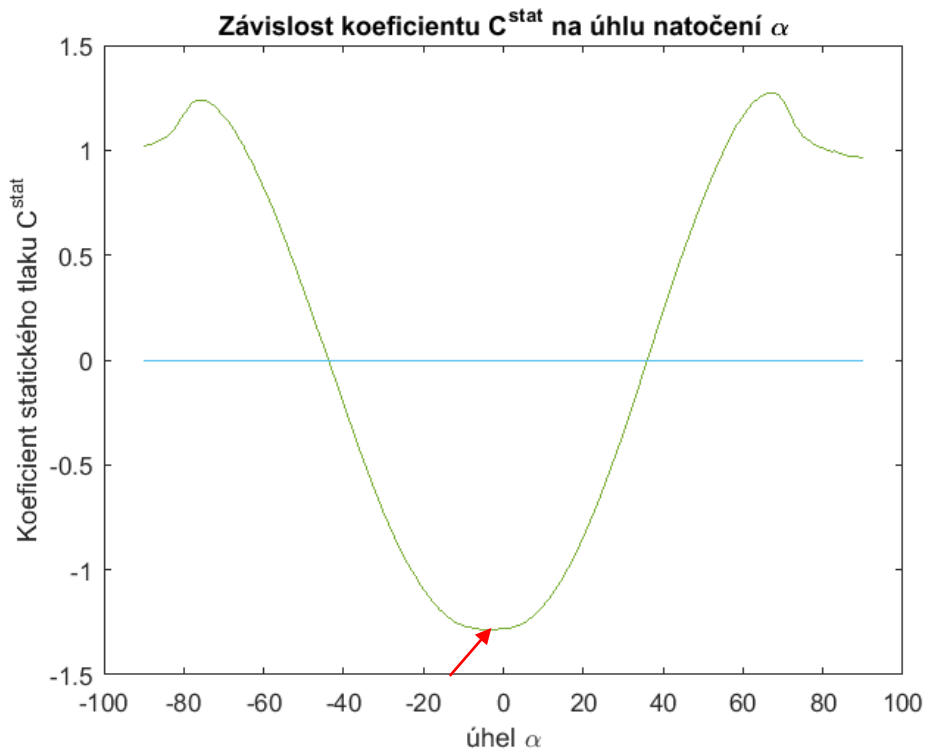
$$C_p^{ALFA} = \frac{p_2 - p_3}{p_1 - p}$$

Kde tlak p je aritmetický průměr z bočních odběrů $\Rightarrow p = \frac{p_2 + p_3}{2}$.

11.4.3. Výsledky měření

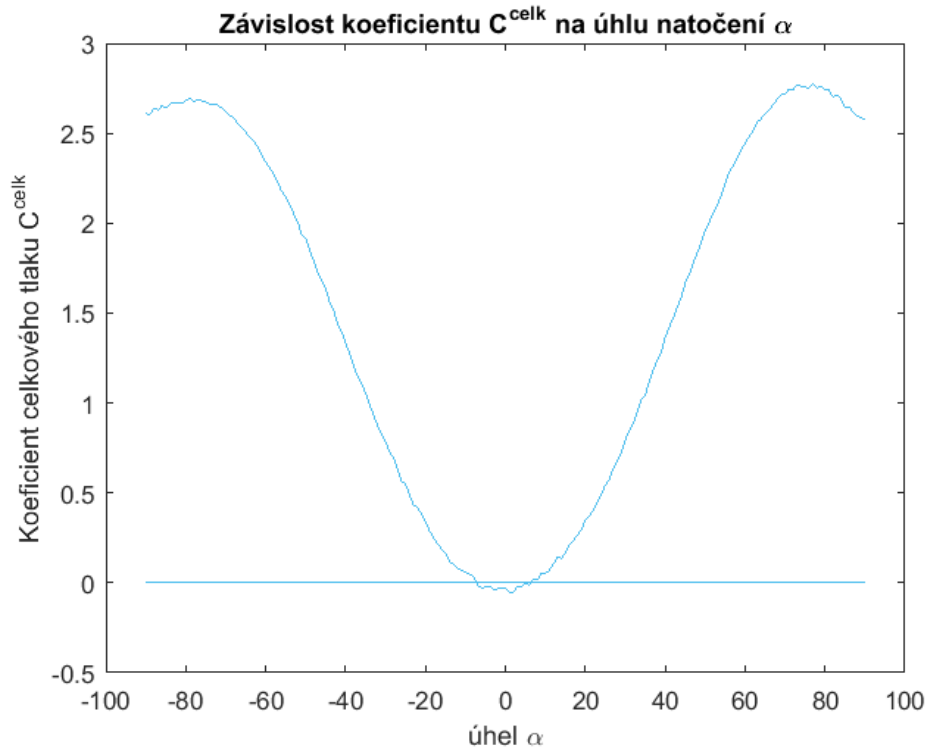


Obr. 24: Průběh hodnot koeficientu C_p^{STAT} na úhlu natočení α při měření za lopatkovým kolem

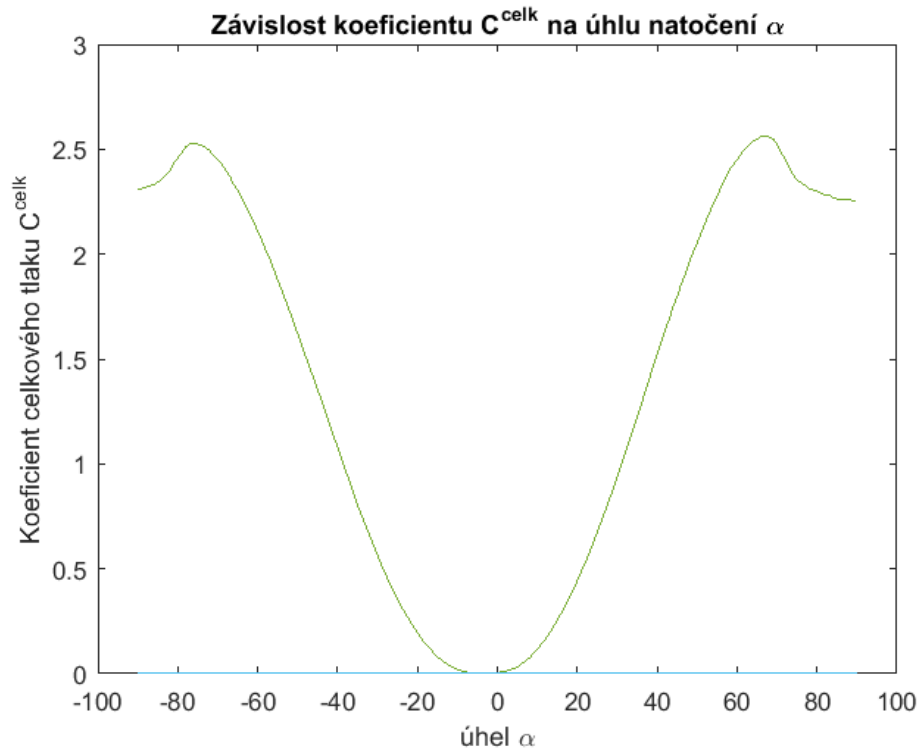


Obr. 25: Průběh hodnot koeficientu C_p^{STAT} na úhlu natočení α při měření v proudě na výstupu z tunelu

Průběhy koeficientu C_p^{STAT} jsou si značně tvarové podobné. Hlavní odlišností je posun spodního extrému o cca. -0,15 u výstupu přímo z tunelu. Nabyté hodnoty koeficientu se v krajních rozmezích úhlu α liší oproti koeficientu získaného pro místo za oběžným kolem o cca -0,35 až -0,5. Spád křivek byl přibližně stejný.

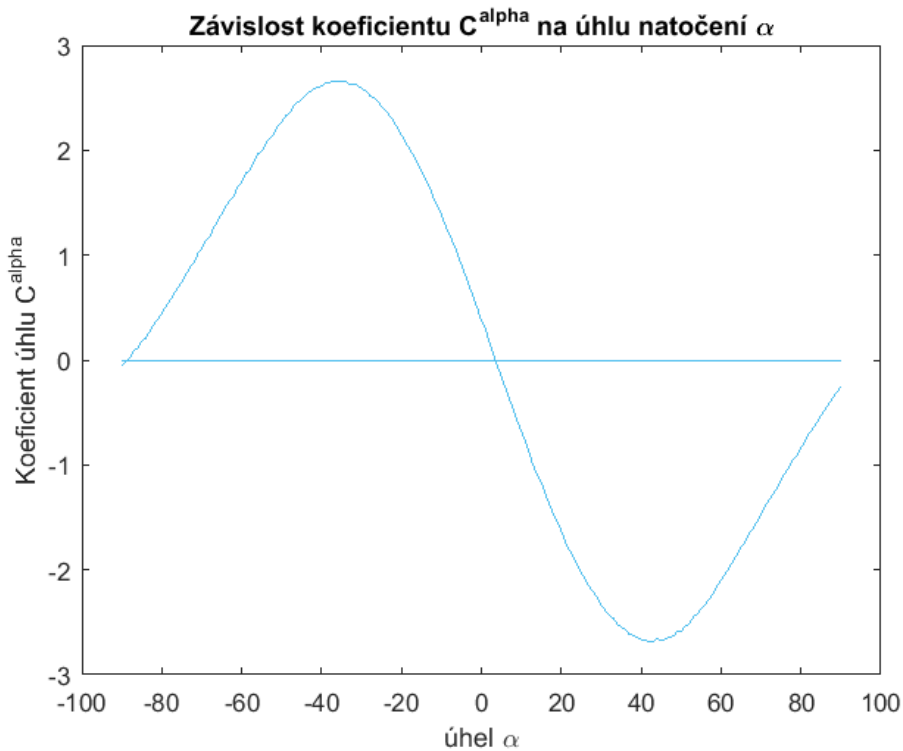


Obr. 26: Průběh hodnot koeficientu C_p^{CELK} na úhlu natočení α při měření za lopatkovým kolem

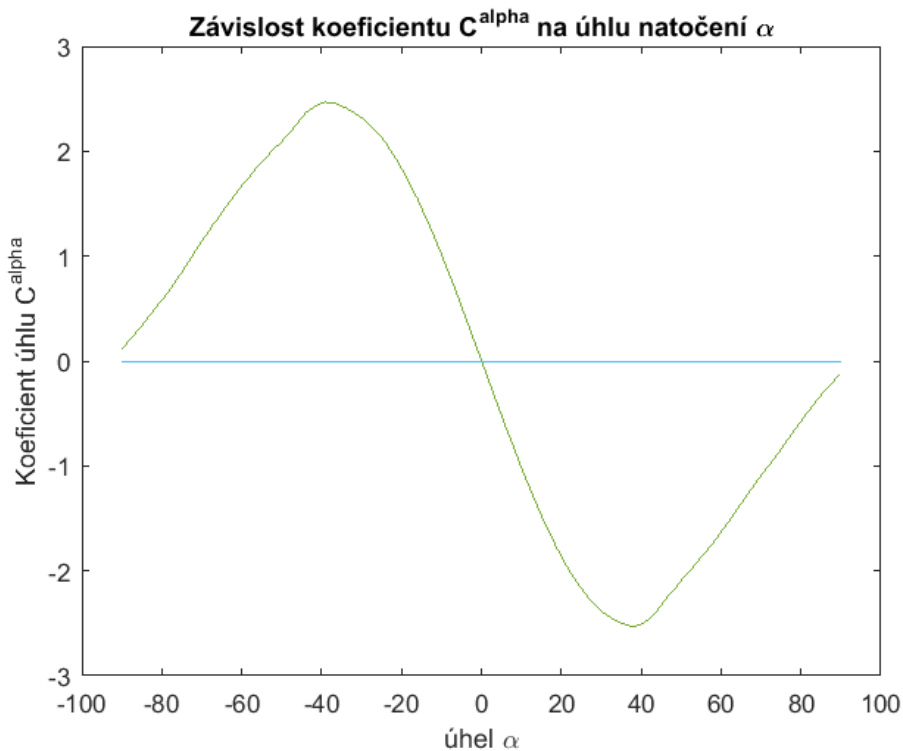


Obr. 27: Průběh hodnot koeficientu C_p^{CELK} na úhlu natočení α při měření v proudě na výstupu z tunelu

Průběhy koeficientu C_p^{CELK} si byly v celém rozmezí velmi podobné. Rozdíly v krajních bodech intervalu α mají hodnotu přibližně 0,3 – 0,4. Hodnoty minim jsou prakticky totožné.



Obr. 28: Průběh hodnot koeficientu C_p^{ALFA} na úhlu natočení α při měření za lopatkovým kolem



Obr. 29: Průběh hodnot koeficientu C_p^{ALFA} na úhlu natočení α při měření v proudu na výstupu z tunelu

V obou případech průběh koeficientu C_p^{ALFA} připomínala funkci sinus s amplitudou 2,66 a 2,47. Průběhy si byly velmi podobné, nikoli totožné. Pro případná další měření by byla vybrána data s volným tunelem uvolněným o turbínku, kdy by byly lépe známy parametry proudu.

11.5. Odhad nejistot načítání tlaku 3-otvorové sondy. Statistické vyhodnocení.

11.5.1. Příprava úkolu 5

Měřená data nejsou nikdy z důvodu řetězců, přepočtů jedné veličiny na jinou či omezené citlivosti zařízení zcela přesné. Tyto odchylky popisují nejistoty měření. Nejistota měření lze považovat za míru pochybnosti o správnosti výsledku.

11.5.2. Postup výpočtu

V tomto vyhodnocování jsme se zaměřili pouze na poslední část, a to je vlastní odečet dat, zde tlaků, v proudu. Měření tlaků probíhalo za stejných podmínek jako v předchozím úkolu. Odečítaly se tlaky za rotujícím kolem a poté bez konstrukce turbínky na úrovni konce dýzy tunelu. Rychlost otáček byla nastavena na 1600 ot./min. V každém nastaveném bodě bylo zaznamenáno větší množství dat, aby byla splněna podmínka statistické nezávislosti. Zde 350 prvků.

Pro zjištění obecného chování dat bylo využito statistiky. Statistiku používáme pro určení obecných pravd, které plynou z prakticky jakkoliv velkého souboru dat. Využívá se nástrojů jako jsou střední hodnoty, nejčastější hodnoty, procentuální výskyt hodnoty, a další. Tyto hodnoty nám zobecňují chování celého komplexu dat. V některých případech mohou být značně nevyovídající. To je avšak ošetřeno jinými nástroji, které by tuto skutečnosti indikovaly.

Prakticky nejvíce vypovídající křivkou celé statistiky je křivka normálního rozložení pravděpodobnosti, tzv. Gaussovo rozdělení. Tato křivka je popsána vztahem

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

Lze si všimnout, že funkce **výrazně závisí** na průměrné hodnotě souboru \bar{x} a směrodatné odchylce σ . [15]

Obecně lze jakoukoliv hodnotu souboru popsat součtem střední hodnoty, která není časově závislá a fluktuace, která časově závislá je.

$$x(t) = \bar{x} + x'(t)$$

Data často rozdělujeme do intervalů, které rozdělují data podle pravděpodobnosti výskytu a jejich relevantnosti. Zvětšováním rozsahu do intervalu začne spadat větší množství naměřených hodnot. Gaussova křivka je tedy rozdělena do několika segmentů buďto kvartily, nebo pravidlem 68-95-99,7. Za průměrný výsledek se považuje aritmetický průměr \bar{x} , integrálně zapsán vztahem níže.

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Velikost chyby je dána směrodatnou odchylkou σ , podle vztahu

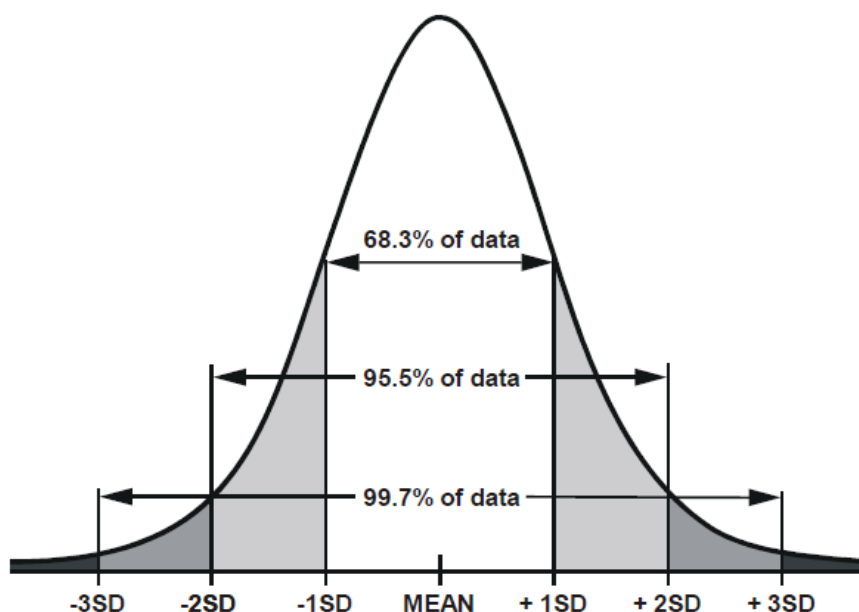
$$\sigma = \sqrt{\overline{x'^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x'^2 dt}$$

Výše uvedených vztahu pro \bar{x} a σ se používá pro sestavení Gaussovy křivky.

Pravidlo 68-95-99,7 rozděluje graf do několik intervalů. Intervaly popisují, s jakou pravděpodobností se tam hodnota vyskytuje. Rozmezí jsou dána vztahem

$$x = \bar{x} \pm i\sigma$$

kde $i = 1, 2, 3$.



Obr. 30: Plochy pod křivkou normálního rozdělení leží mezi násobky 1, 2, 3 směrodatné odchylky na každé straně od hodnoty aritmetického průměru [18]

Interval $x = \bar{x} \pm \sigma$ popisuje plochu pod křivkou hustoty pravděpodobnosti a poskytuje 68,3% šanci výskytu sledované hodnoty souboru.

Interval ohraničen vzdálenostmi dvojnásobku směrodatné odchylky od střední hodnoty, též označován jako pravděpodobná chyba, obsahuje data s pravděpodobností 95,5 %.

Posledním běžně užívaným intervalem je interval trojnásobné vzdálenosti od střední hodnoty. Tento rozsah vymezuje oblast, kde hodnota leží s pravděpodobností 99,7 %. Nazývá se krajní chyba.

Vyhodnocovány byly i další hodnoty jakou jsou modus, medián, rozptyl, šikmost a špičatost.

Modus \hat{x} je nejčastěji vyskytující se hodnota. Využívá se zejména u případů, kde průměr není zcela přesně vypovídající [16].

Medián \tilde{x} určuje prostřední hodnotu souboru. V případě sudého počtu prvků souboru se zjišťuje jako aritmetický průměr dvou prostředních hodnot. Opět se používá spíše v případech, kde průměr není zcela vypovídající [16].

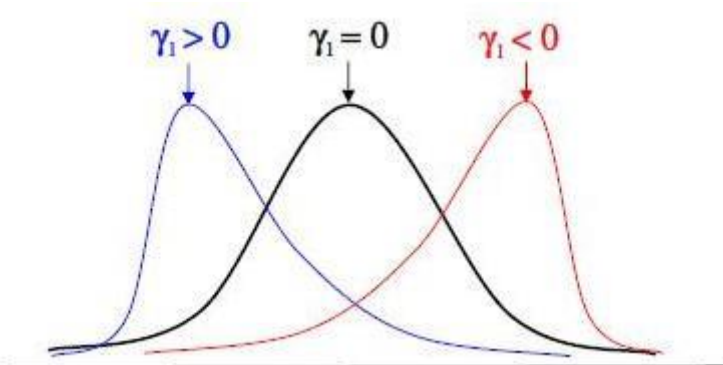
Rozptyl popisuje, v jaké míře jsou data rozptýlena kolem střední hodnoty. Čím menší je rozptyl, tím více soudržný soubor je. Druhá odmocnina z rozptylu je směrodatná odchylka [17].

$$\overline{x'^2} = \frac{1}{T} \int_0^T x'^2 dt$$

Dalšími vyhodnocovanými statistickými momenty jsou šikmost a špičatost. Oba výpočty zkoumají změnu tvaru oproti normální Gaussově křivce.

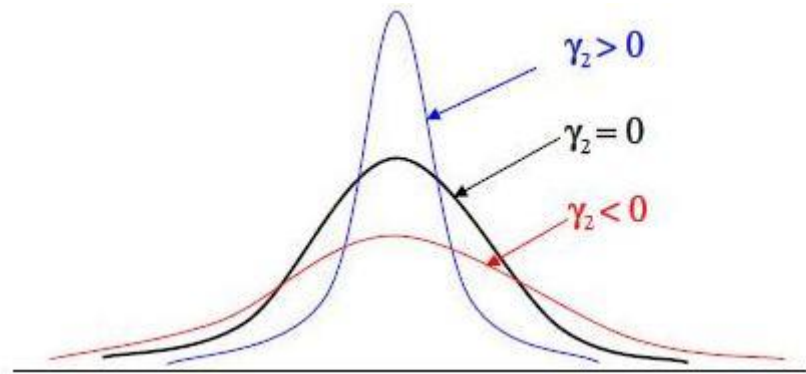
Šikmost popisuje, kterým směrem jsou data asymetricky rozložena kolem přímky symetrie, zde přímka průměrné hodnoty. Rozlišujeme dva typy. Pravostrannou, kde se většina dat nachází pod průměrem, symbolizovaná kladnou hodnotou šikmosti. A levostrannou, též zápornou, kde se většina dat nachází nad průměrem. Tam je hodnota šikmosti záporná. V případě nulové hodnoty je křivka symetrická. Matematicky lze šikmost vyjádřit pomocí druhého a třetího momentu [18], [19].

$$\gamma_1 = \frac{m_3}{m_2^{\frac{3}{2}}} = \frac{\overline{x'^3}}{\overline{x'^2}^{\frac{3}{2}}}$$



Obr. 31: Rozložení dat dané šikmostí γ_1 [18]

Špičatost značí hustotu nakupení hodnot souboru kolem těžiště. Principiálně jde o porovnání četností znaku prostřední velikosti s okolními. Pokud četnosti v prostřední části jsou výrazně vyšší než konce, jedná se o rozložení více do špičky. Tomuto rozložení se říká *leptokurtické*. V případě, že jsou si četnosti podobné a ke koncům klesají, je graf výrazně plošší. Nazývá se *platykurtické* [18].



Obr. 32: Rozložení dat dané koeficientem špičatosti γ_2 [18]

Jaký typ grafu máme před sebou, závisí na koeficientu γ_2 . Pokud nabývá koeficient hodnoty nula, je normálního rozložení. Pokud je koeficient kladný, rozdělení je špičatější. Jedná se o leptokurtické rozložení. Při záporné hodnotě je rozložení plošší, tzv. platykurtické.

Matematicky se využívá čtvrtého a druhého momentu [19].

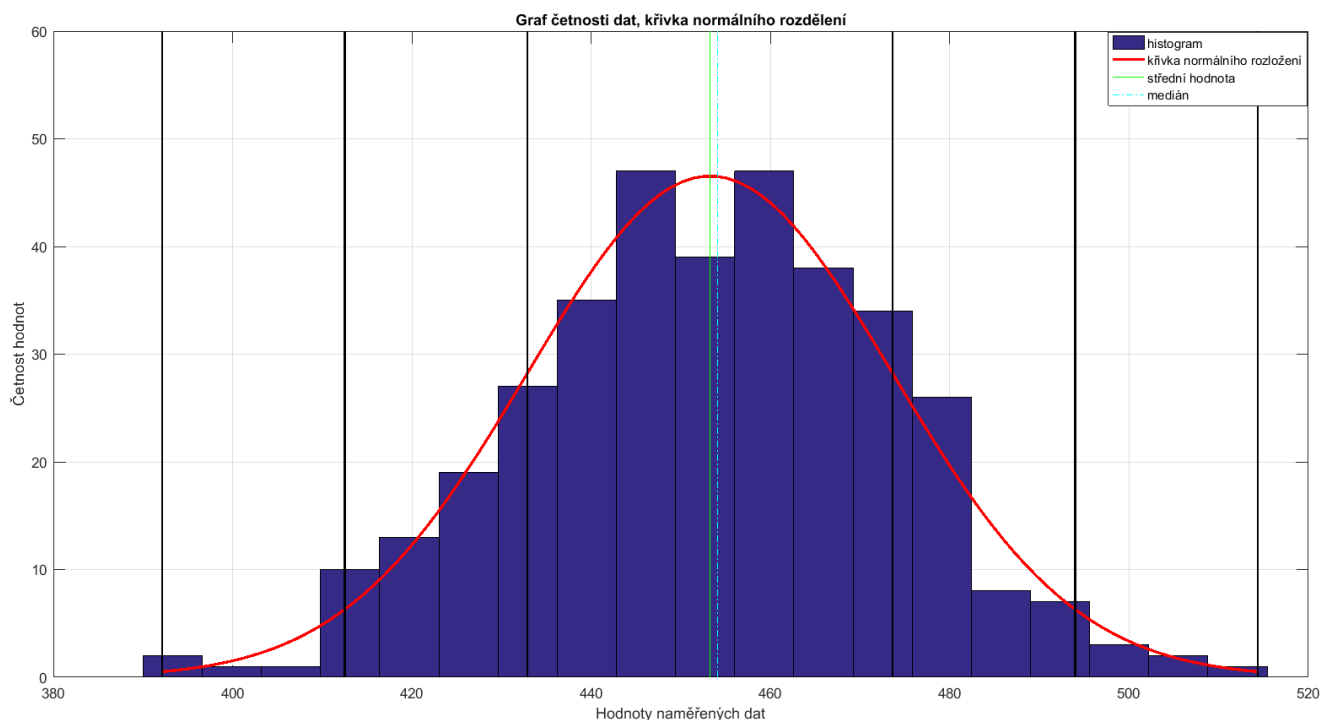
$$\gamma_2 = \frac{m_4}{m_2^2} - 3 = \frac{\overline{x'^4}}{x'^2^2} - 3$$

V neposlední řadě je potřebné zmínit minimální počet prvků souboru, které se musí odečíst z důvodu relevance výsledků. Velmi záleží na velikosti vzorkovací frekvence. S rostoucí velikostí vzorkovací frekvence roste i počet nutných naměřených dat. Při nedostatku bychom měli data, která by popisovala pouze zlomek celkového průběhu. Snaha je, aby data na sobě nebyla statisticky závislá. Proto je pro každý bod vyžadováno minimálně 200 hodnot. Při našich experimentech jsme toto číslo volili v rozmezí 300 ÷ 400.

Cílem úkolu bylo zjistit rozložení naměřených dat a vyjádřit jejich relevanci. Pro statistické vyhodnocení byly vybrány hodnoty tlaků ze středního a pravého odběru sondy. Tyto tlaky jsou měřeny relativně k atmosférickému tlaku. U souboru jsme určili normální rozložení, pravidlem 68-95-99,7 rozdělili graf na intervaly hustot pravděpodobností, střední hodnotu, modus, medián, směrodatnou odchylku, rozptyl, šikmost a špičatost. Druhým cílem bylo stanovení určení střední hodnoty rychlosti. Následně bylo provedeno porovnání této rychlosti naměřené 3-otvorovou pneumatickou sondou s velikostí rychlosti z HWA sondy.

11.5.3. Výsledky měření

Měření za volně se protácejícím kolem.



Obr. 33: Histogram s četnostmi dat a křivkou normálního rozložení. Přímkou vyznačující průměrnou hodnotu (zelená) a medián (tyrkysová). Intervaly 68-95-99,7 jsou rozděleny černými křivkami o délce σ

Data skutečně odpovídala normálnímu rozdělení, což značilo jejich relevantnost k dalším použitím. V případě, že by tomu tak nebylo, data by byla považována za nepřesná a nevypovídající. Lze si všimnout, že střední hodnota a medián nesplývaly. To značí určitou šikmost.

Střední hodnota tlaku ze středního odběru vůči tlaku atmosférickému byla rovna 453,24 Pa.

Medián byl mírně vyšší, 454,08 Pa.

Nejčastější hodnota \hat{x} byla rovna 445,36 Pa.

Velikost směrodatné odchylky σ byla cca 20,37 Pa.

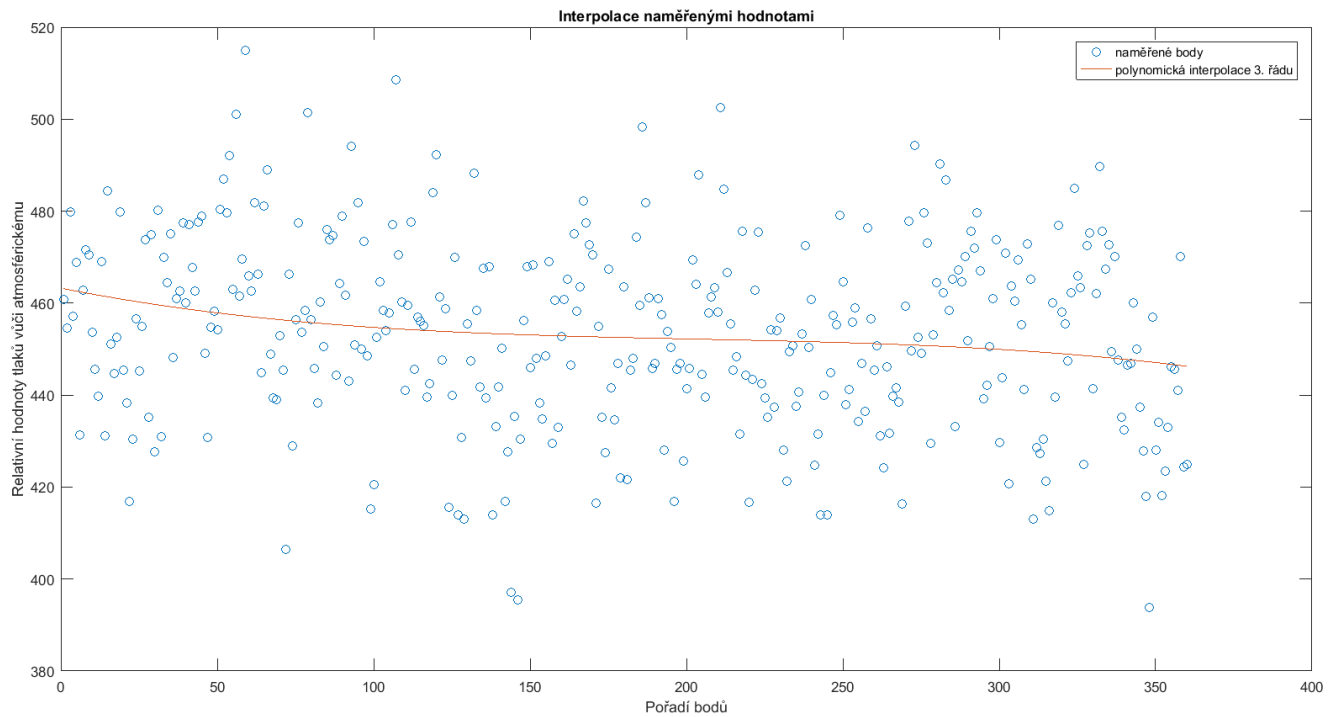
Výsledek odhadu nejistoty měření relativní hodnoty tlaku x s pravděpodobností 68,3 %

$$x = 453,24 \pm 20,37$$

Rozptyl je druhá mocnina σ a měl velikost cca 414,82 Pa.

Jednalo se o levostrannou šikmost o hodnotě -0,0618. Prakticky se jednalo o vyvážený graf podél střední hodnoty.

Špičatost γ_2 byla rovna -0,0382. Prakticky se jednalo o graf podobající se ideálnímu normálnímu rozložení. Stále se však jednalo o mírnou, prakticky neznatelnou plochost.

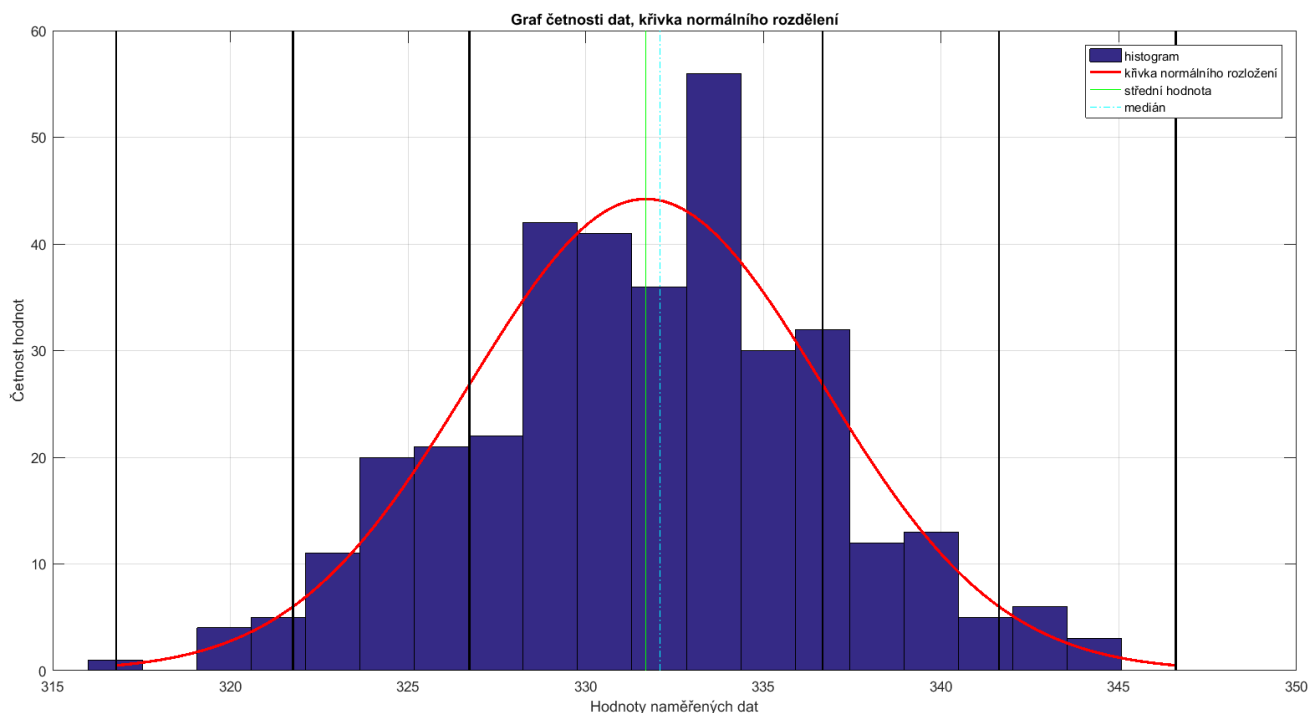


Obr. 34: Graf obsahuje hodnoty relativních tlaků vůči tlaku atmosférickému ze středního odběru. Daty je proloženo polynomem 3. stupně

Polynom 3. stupně je nejčastěji používaný polynom, jelikož je schopen již velmi dobře popisovat průběhy. Polynom (označený červeně) prochází napříč grafem v blízkosti vypočtené střední hodnoty \bar{x} .

Průměrná rychlost dosáhla za kolem rychlosti 26,6278 m/s.

Měření na úrovni výstupu z tunelu bez konstrukce kola



Obr. 35: Histogram s četnostmi dat a křivkou normálního rozložení. Přímku vyznačující průměrnou hodnotu (zelená) a medián (tyrkysová). Intervaly 68-95-99,7 jsou rozděleny černými křivkami o délce σ

Vyhodnocené četnosti opět nabývaly poměrně kvalitního zastoupení a kopírovaly až na výjimky křivku normálního rozložení. V tomto případě byla zjištěna větší vzdálenost mezi mediánem a střední hodnotou, což značilo větší šikmost. Směr šikmosti byl stejný.

Střední hodnota tlaku ze středního odběru vůči tlaku atmosférickému byla rovna 331,70 Pa.

Hodnota mediánu pak 332,08 Pa. Prostřední hodnota byla zanedbatelně vyšší než hodnota střední.

Modus nabýval hodnoty 333,07 Pa relativně k atmosférickému tlaku.

Velikost směrodatné odchylky σ byla čtyřikrát nižší než u varianty s kolem. Hodnota σ dosahovala cca. 4,97 Pa.

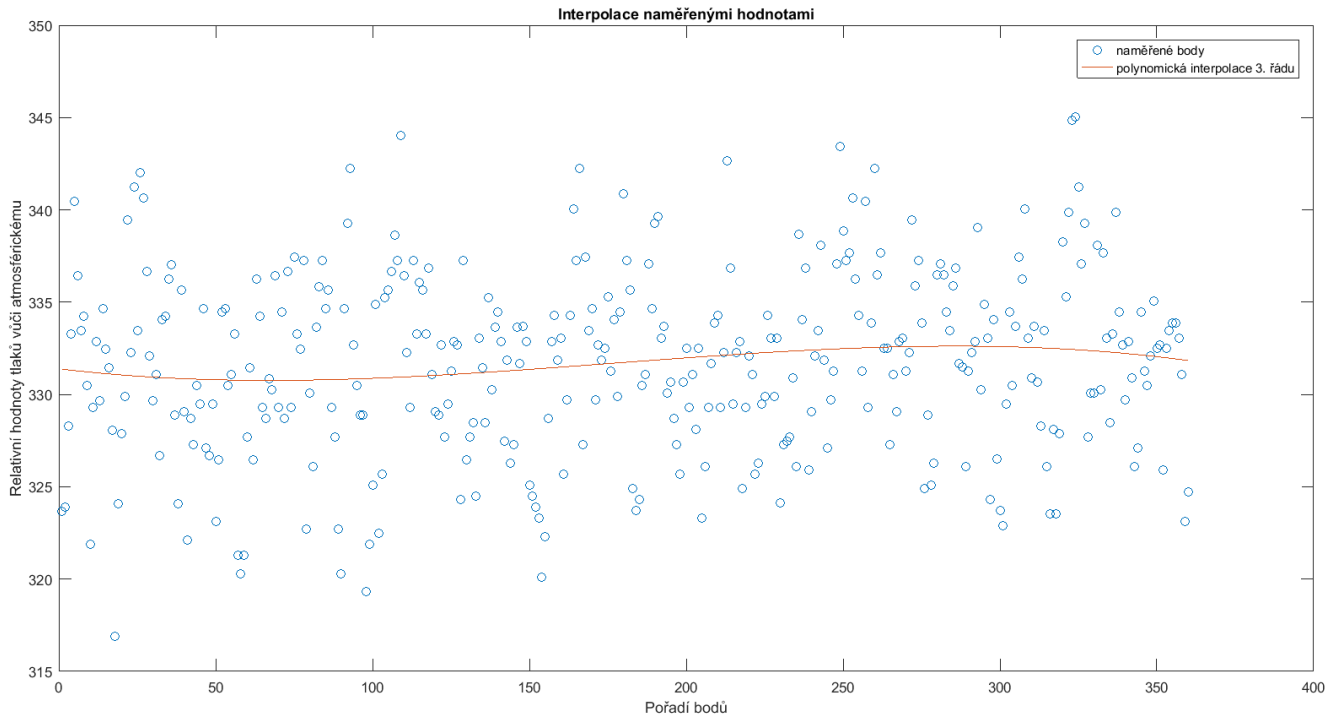
Výsledek odhadu nejistoty měření relativní hodnoty tlaku x s pravděpodobností 68,3 %

$$x = 331,70 \pm 4,97$$

Rozptyl je druhá mocnina σ . Oproti předchozí variantě byla 4²krát menší. Druhá mocnina fluktuací potom nabývala hodnoty 24,68 Pa.

Šikmost γ_1 o hodnotě -0,0489 je považovaná za levostrannou. Šikmost se blížila nule, a proto můžeme tvrdit, že se jednalo o vyvážený graf podél střední hodnoty.

Špičatost γ_2 byla rovna -0,1163. Prakticky se jednalo o graf podobající se ideálnímu normálnímu rozložení. Plochost byla mírně vyšší než u předchozí varianty, avšak nelišila se příliš od ideálního rozložení.



Obr. 36: Graf obsahuje hodnoty relativních tlaků vůči tlaku atmosférickému ze středního odběru. Daty je proloženo polynomem 3. stupně

Polynom 3. stupně je nejčastěji používaný polynom, jelikož je schopen již velmi dobře popisovat průběhy. Červený polynom prochází napříč grafem v blízkosti vypočtené střední hodnoty \bar{x} jako tomu bylo i u první varianty. Vypočtený průměr lze považovat za dostatečně přesný prvotní údaj.

Průměrná rychlost dosáhla na výstupu z dýzy rychlosti 41,6668 m/s. Tuto rychlost nemáme s čím porovnat a je pouze informativní.

12. Závěr

Provedená měření byla uskutečněna v vzduchovém tunelu experimentálního střediska plzeňského závodu Doosan Škoda Power s.r.o.. Experimenty probíhaly pod vedením Ing. Kamila Sedláka, Ph.D. Sondy a veškeré vybavení je majetkem již jmenovaného podniku nebo Západočeské univerzity v Plzni.

Vypočtením proudových parametrů volně se otáčejícího kola jsme analyticky zhodnotili lopatkové kolo. Za daných provozních podmínek a konkrétní konstrukce turbíny byly vyhodnoceny tyto informace:

1. O výstupním úhlu α_4 po délce lopatky můžeme říci, že se vzdáleností od středu téměř lineárně roste. A to od hodnot -3° až 78° . Směrnice nabývala necelé jedničky.
2. Celkový tlak na vstupu P_{c1} byl velmi kolísavý po celé délce lopatky. Trend byl stoupavý. Celkový tlak se pohyboval v rozmezí hodnot 98622 až 98634 Pa.
3. Statický tlak na vstupu P_{s1} byl rostoucího charakteru. Rozmezí tlaku 97954 ÷ 97968 Pa.
4. Celkový tlak na výstupu z kola P_{c4} vykazoval velmi zajímavý periodický průběh s rostoucí amplitudou. Nejvyšší hodnoty tlaku dosahovaly 105000 Pa, nejnižší mírně pod 98000 Pa. Zde si lze všimnout značně rozdílného (většího) tlakového rozmezí v porovnání s celkovým tlakem na vstupu.
5. Absolutní rychlost w_3 na výstupu z lopatkové klece. Hodnota byla do kritického bodu na hraně kola konstantní o hodnotě 43 m/s.

Při kalibraci za Prandtlovy sondy v proudu při 2000 ot/min, kde sondou bylo otáčeno pouze kolem vlastní osy sondy, byl zjištěn ideální úhel α :

$$\alpha = 4,98^\circ$$

Při kalibraci v bodovém poli 21x21 byly určeny hodnoty úhlů α a ε následovně:

$$\alpha = -1,98^\circ$$

$$\varepsilon = 1,96^\circ$$

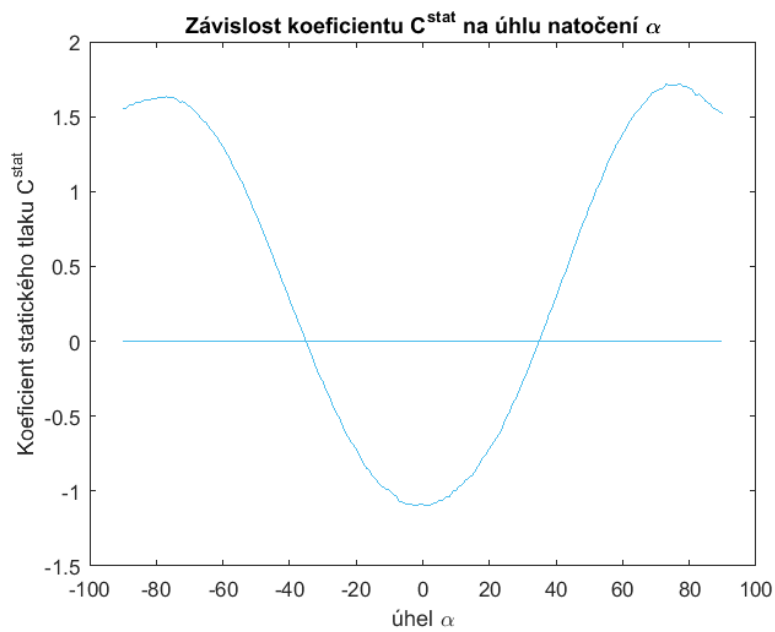
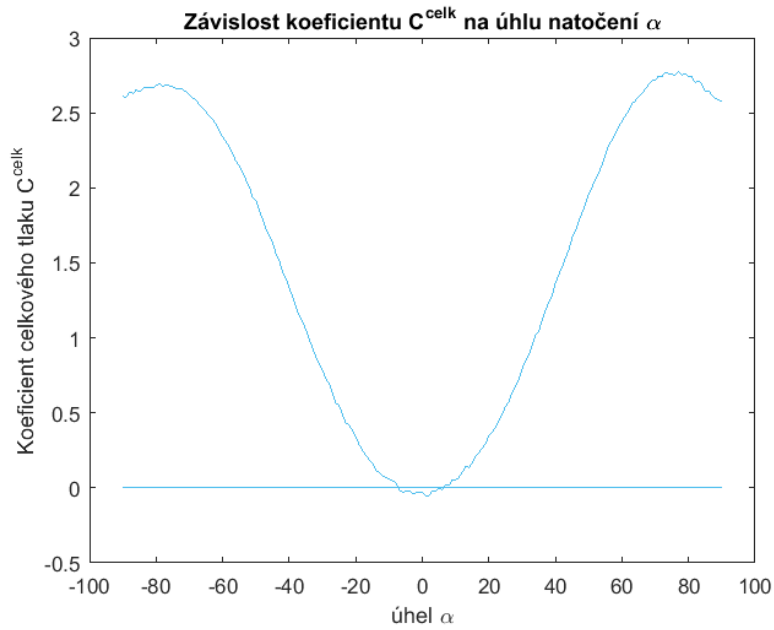
Využíváním HWA jsme byli schopni zachytit velmi přesná data o vysoké frekvenci fluktuací. Rychlá odezva z Wheatstonova můstku umožňovala zachytit i nejmenší změny v proměnném odporu, a tím určit rychlost média. Ze signálu byla vypočtena lopatková frekvence a střední rychlost proudu.

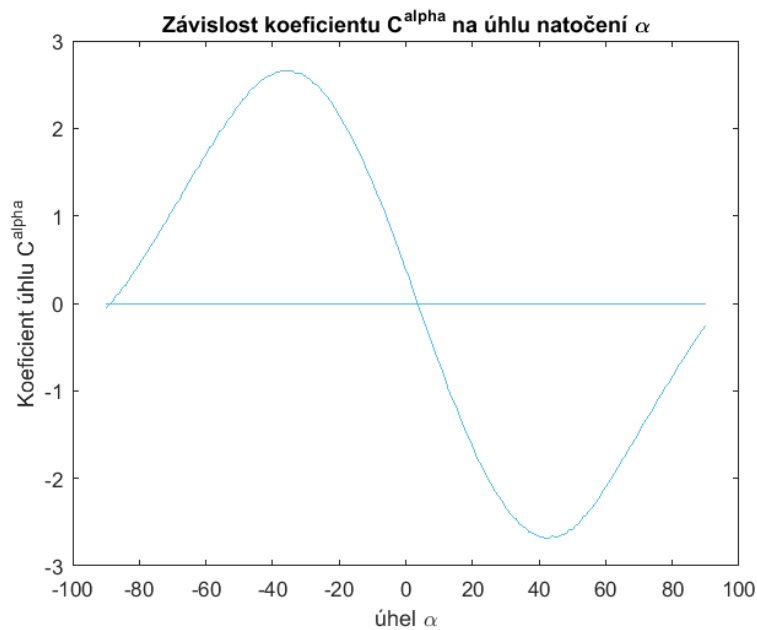
$$\text{Lopatková frekvence} = 110,3246 \text{ Hz} \approx 6620 \text{ ot/min}$$

$$\text{Střední rychlost} = 33,0781 \text{ m/s}$$

Úkolem během kalibrace 3-otvorové sondy bylo stanovení průběhu kalibračních koeficientů C_p^{STAT} , C_p^{CELK} a C_p^{ALFA} . Koeficienty byly určovány při proudění skrze otáčivé kolo a pro volný výstup proudu z tunelu. Průběhy koeficientů statického a celkového v závislosti na úhlu natočení α si byly tvarově podobné, průběhem připomínají goniometrickou funkci cosinus. Průběh koeficientu úhlu alpha měl naopak charakter funkce sinu.

Obrázky průběhů koeficientů pro proudění za otáčivým kolem. Grafy jsou v tomto případě mnohonásobně lépe vypovídající.





Sběr dat je velmi důležitou součástí veškerého měření. Chyby způsobené nedostatečnou citlivostí měřicího a detekčního zařízení či chybami v řetězci se promítanou do správnosti dat a jejich důvěryhodnosti. I v jednom konkrétním bodě byly naměřeny hodnoty, které se od sebe lišily. Pro určení středních hodnot a eliminaci hodnot málo četných či výrazně vybočujících jsme využili statistiky. Statistika je matematický nástroj, který nám tyto nepřesnosti dokáže potlačit, a proto získat co nejrelevantnější informace.

Ze souboru dat byly vybrány 2 body. Oba zaznamenávaly velikost tlaků vůči referenční hodnotě atmosférického tlaku. Oba body splňovaly podmínku normálního rozložení.

První bod obsahoval hodnoty s 68,3% pravděpodobností výskytu v intervalu

$$x = 453,24 \pm 20,37 \text{ Pa}$$

Prvky prvního bodu vykazovaly prakticky zanedbatelnou levostrannou šikmost i špičatost. Graf byl prakticky zcela normálního rozložení.

Průměrná rychlost proudu při 1600 ot./min byla v tomto bodě rovna 26,6278 m/s.

V porovnání s metodou HWA, kde střední rychlost proudu byla 33,0781 m/s, byla chyba měření pneumatickou sondou téměř 20 %, přesněji 19,5 %. Z toho vyplývá, že pneumatická sonda nebyla schopna reagovat na rychlé a drobné změny fluktuací na rozdíl od metody HWA. Nebyla tudíž dostatečně citlivá. Proto experimentálně získané výsledky hodnot rychlosti pomocí metody HWA byly považovány za přesnější.

Druhý bod byl oproti prvnímu naměřen **bez konstrukce turbínky**, to znamená pouze ve výstupu z dýzy, a též jiným odběrem. Do prvního intervalu s rozmezím

$$x = 331,70 \pm 4,97 \text{ Pa}$$

náleželo 68,3 % dat.

Směrodatná odchylka zde byla téměř 4krát menší než u bodu jedna. Rozptyl dat zde byl tedy znatelně menší, cca. 16krát.

Graf vykazuje drobnou levostrannou šikmost i špičatost. Výsledky opět velmi kvalitně kopírovaly křivku normálního rozložení.

Podmínka normálního rozložení je příznivý fakt, který podporuje věrohodnost dat.

Rozdíl ve středních rychlostech naměřených HWA sondou a tříotvorovou pneumatickou sondou je 19,5 % vůči HWA sondě, což je znatelné! Toto bylo způsobeno velmi nízkou schopností pneumatické 3-otvorové sondy reagovat na vysokorychlostní fluktuace proudu. Metodou HWA bylo možno tyto fluktuace zachytit, a proto výsledek rychlosti z této sondy měl větší vypovídající hodnotu.

13. Použitá literatura

- [1] BARLOW, Jewel B., William H. RAE a Alan POPE. *Low-speed wind tunnel testing*. 3rd ed. New York: Wiley, c1999. ISBN 0-471-55774-9.
- [2] BENEDICT, Robert P. *Fundamentals of temperature, pressure, and flow measurements*. 2d ed. New York: Wiley, c1977. ISBN 0-471-06561-7.
- [3] Comsol. *Piezoresistive Effect* [online]. [cit. 6.5.2018]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/piezoresistive-effect>
- [4] APC. *Piezoelectric Effect vs. Piezoresistive Effect* [online]. 16.10.2017 [cit. 6.5.2018]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/blog/piezoelectric-vs-piezoresistive/>
- [5] National Aeronautics and Space Administration. *Pitot-Static Tube* [online]. [cit. 6.5.2018]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/pitot.html>
- [6] NPTEL. *Concept of Static Pressure. Measurement of Static Pressure* [online]. [cit. 6.5.2018]. Dostupné z: http://www.nptel.ac.in/courses/112104118/lecture-16/16-1_concept_static_pressure.htm
- [7] SEDLÁK, Kamil. *Odhad nejistot měření teploty při uvažování celého řetězce*. Pro: Doosan Škoda Power s.r.o, Plzeň. Plzeň. 2014. Č. zprávy TZTP 0886
- [8] VREE, Peter. *RTD PT100 (Resistance Temperature Detector) Tutorial* [video online]. 21.11.2017. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PZ-Eizpb5tY>
- [9] ČSN EN 60751. *Průmyslové platinové odporové teploměry a platinové teplotní senzory*. Praha: Český normalizační institut, 2014.
- [10] ČÁMEK, J. *Studie konstrukce zařízení pro kalibraci pneumatických sond v nestacionárním -proudovém poli*. Plzeň. 1981. Č. zprávy: SVÚSS
- [11] DANTEC DYNAMICS. *Measurement principles of CTA* [online]. [cit. 7.5.2018]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-cta>
- [12] BRUUN, H.H. *Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press/, 1996. ISBN 0-19-856342-6.
- [13] ŠKORPÍK, Jiří. *Návrh axiálních stupňů lopatkových strojů* [online]. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/19.html>
- [14] TROPEA, Cameron a kolektiv. *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*. Berlin, c.2007. p.227. ISBN: 978-3-662-49162-1
- [15] MATEMATIKA.CZ. *Rovnoměrné a normální rozložení četnosti* [online]. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni>
- [16] HAZARDNÍ HRY. *Modus a medián* [online]. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://www.hazardni-hry.eu/statistika/modus-median.html>
- [17] HAZARDNÍ HRY. *Rozptyl* [online]. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <https://www.hazardni-hry.eu/statistika/rozptyl.html>

[18] HENDL, Jan. Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. 3., přeprac. vyd. Praha: Portál, 2009. ISBN 978-80-7367-482-3.

[19] URUBA, Václav. *Mechanika Tekutin 2*. Přednáška 1 - Statistika.

[20] AEROPROBE. L-Shaped Probe [online]. [cit. 10.5.2018]. Dostupné z: <http://www.aeroprobe.com/l-shaped-probe/>

14. Seznam obrázků

Obr. 1.....	5
Obr. 2.....	8
Obr. 3.....	9
Obr. 4.....	9
Obr. 5.....	11
Obr. 6.....	11
Obr. 7.....	12
Obr. 8.....	13
Obr. 9.....	15
Obr. 10.....	17
Obr. 11.....	20
Obr. 12.....	21
Obr. 13.....	23
Obr. 14.....	27
Obr. 15.....	31
Obr. 16.....	32
Obr. 17.....	32
Obr. 18.....	33
Obr. 19.....	33
Obr. 20.....	35
Obr. 21.....	35
Obr. 22.....	37
Obr. 23.....	38
Obr. 24.....	39
Obr. 25.....	39
Obr. 26.....	40
Obr. 27.....	40
Obr. 28.....	41
Obr. 29.....	41
Obr. 30.....	43
Obr. 31.....	44
Obr. 32.....	45
Obr. 33.....	46
Obr. 34.....	47
Obr. 35.....	48
Obr. 36.....	49

15. Přílohy

Zdrojové kódy pro vyhodnocení naměřených dat v softwaru MATLAB

Obsah příloh

I	Zdrojový kód k úkolu 1	i
	CallMyMatrices	i
	Výpočet parametrů	ii
II	Zdrojový kód k úkolu 2	vi
	Kalibrace jednoosá	vi
	Kalibrace v síti	vi
III	Zdrojový kód k úkolu 3	viii
IV	Zdrojový kód k úkolu 4	xi
V	Zdrojový kód k úkolu 5	xii

I Zdrojový kód k úkolu 1

CallMyMatrices

```
[Pred]=NactiPred( ); % načtení naměřených dat
[Za]=NactiZa( );
clear CisloP PitotkaP PbP TcP CisloZ PitotkaZ PbZ TcZ g j i Pc1Razene Pc3Razene
PbRazene PbZaRazene TcRazene TcZaRazene PradtIC PradtID Ps1Razene

%%
CisloP = Pred(:,1); % číslo měření před
PradtIC = Pred(:,3); % Prandtllova sonda před - celkový tlak
PradtID = Pred(:,4); % Prandtllova sonda před - dynamicky tlak
PitotkaC = Pred(:,7); % Pitotova sonda před - celkový tlak
PbP = Pred(:, 8); % atmosféricky tlak před
TcP = Pred(:,9); % teplota před
CisloZ = Za(:,1); % číslo měření za
PitotkaZ = Za(:,7); % Pitotova sonda za - celkový tlak
PbZ = Za(:,8); % atmosféricky tlak za
TcZ = Za(:,9); % teplota za
%%
g = 1;
j = 0;
for i = 1:length(PitotkaC) % rozčlenění výsledků měření do sloupců podle vzdálenosti od paty
    lopatky (po 350 bodech)
    if j < 350
        j = j + 1;
        Pc1Razene(j,g) = PitotkaC(i,1); % rozřazení celkového tlaku z Pitotovy sondy před
        PbRazene(j,g) = PbP(i,1); % rozřazení atmosférického tlaku před
        TcRazene(j,g) = TcP(i,1); % rozřazení teploty před
        Ps1Razene(j,g) = (PradtIC(i) - PradtID(i)); % statický tlak před
        Pc3Razene(j,g) = PitotkaZ(i,1); % rozřazení celkového tlaku z Pitotovy sondy za
        PbZaRazene(j,g) = PbZ(i,1); % rozřazení atmosférického tlaku za
        TcZaRazene(j,g) = TcZ(i,1); % rozřazení teploty za
    else
        j = 1;
        g = g + 1;
        Pc1Razene(j,g) = PitotkaC(i,1);
        PbRazene(j,g) = PbP(i,1);
        TcRazene(j,g) = TcP(i,1);
        Ps1Razene(j,g) = (PradtIC(i) - PradtID(i));
        Pc3Razene(j,g) = PitotkaZ(i,1);
        PbZaRazene(j,g) = PbZ(i,1);
        TcZaRazene(j,g) = TcZ(i,1);
    end
end
end
```

%%

Pc1Razene = Pc1Razene + PbRazene; % referenční celkový tlaku vůči tlaku barometrickému (před) + tlak barometrický

Pc3Razene = Pc3Razene + PbZaRazene; % referenční celkový tlaku vůči tlaku barometrickému (za) + tlak barometrický

Ps1Razene = Ps1Razene + PbRazene; % referenční statický tlaku vůči tlaku barometrického (před) + tlak barometrický

Výpočet parametrů

```
clear n r1 r2 R l pb k r Tc1 q c t z del n flop h j i Ps1 Pc3 Pd3M PbPred PbZa Pc1 l u beta wax  
w2 s v w1 w2Jinak Alfa2 I ro2 Pc2 eta Tc2 Pc3Pocetne w3 Pc4 Tc4 alfa4 w4 RozdilPbPred  
RozdilPbZa RozdilTepPred RozdilTepZa
```

CallMyMatrices % volání předchozí funkce

n = 6600; % otáčky za minutu

r1 = 35; % patní poloměr v mm

r2 = 125; % špičkový poloměr v mm

R = linspace(r1,r2,23); % absolutní vzdálenosti od osy turbíny

l = R - r1; % relativní vzdálenosti od nejmenšího poloměru turbíny, paty

u = pi*n/(30*1000)*R; % obvodová rychlost - m/s

beta = (-0.0015602*(R.^2) + 0.60653*R+18.183); % uhel nastaveni lopatky .. rovnici jsem vzal z Excelu od pana Sedlaka - stupně

%% roztažení vektoru

beta=repmat(beta,350,1);

R = repmat(R,350,1);

u = repmat(u,350,1);

Pc1 = Pc1Razene; % celkový tlak před

Ps1 = Ps1Razene; % statický tlak před

Pc3 = Pc3Razene; % celkový tlak za

% Pd3M = ((Pc3Razene - PbZaRazene) + PbZaRazene); % celkový tlak za kolem - atmosféricky (staticky) za kolem = dynamicky tlak

PbPred = PbRazene; % barometrický tlak před

PbZa = PbZaRazene; % barometrický tlak před

Tc1 = TcRazene + 273.15; % teplota před v Kelvinech

z = 30; % počet lopatek

del = 360/z; % uhlová rozteč lopatek ve stupních

s = 2*pi*R*del/360; % rozteč lopatek v závislosti na vzdálenosti od osy

c = 28; % tětíva v mm

v = s/c; % poměrná rozteč

% l; relativní vzdálenost od nejmenšího průměru turbíny

% pb = 97826.1012; % barometrický tlak v Pa

k = 1.4; % kappa

r = 287.1; % J/(kg*K)

% Tc1 = (273.15 + 24.8); % teplota v Kelvinech
t = 2; % tloušťka lopatky v mm
flop = n/60*z; % lopatková frekvence v Hz

%%

wax=zeros(350,23); % alokace paměti

Pc2=zeros(350,23);

Tc2=zeros(350,23);

Ts1=zeros(350,23);

w1=zeros(350,23);

w2Jinak=zeros(350,23);

w2=zeros(350,23);

w1=zeros(350,23);

Alfa2=zeros(350,23);

I=zeros(350,23);

ro2=zeros(350,23);

zeta=zeros(350,23);

Pc3Pocetne=zeros(350,23);

w3=zeros(350,23);

w3a=zeros(350,23);

Pc4=zeros(350,23);

Tc4=zeros(350,23);

alfa4=zeros(350,23);

alfa4OLD=zeros(350,23);

w4=zeros(350,23);

for j = 1:23 % výpočet parametrů v krocích od paty po špičku lopatky (až za ní)

wax(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc1(:,j).*(1-(Ps1(:,j)/Pc1(:,j)).^(k-1)/k)); % uvažovaná rychlost vzduchu

Pc2(:,j) = Pc1(:,j).*(1 + (((k-1).*u(:,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(:,j))).^(k/(k-1))); % celkový tlak 2

Tc2(:,j) = Tc1(:,j) + ((k-1).*u(:,j).^2)/(2.*k.*r); % teplota celková 2

Ts1(:,j) = Tc1(:,j).*(Ps1(:,j)/Pc1(:,j)).^(k-1)/k;

w1(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc1(:,j).*(1-(Ps1(:,j)/Pc1(:,j)).^(k-1)/k));

w2Jinak(:,j) = sqrt(w1(:,j).^2 + u(:,j).^2);

w2(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc2(:,j).*(1-(Ps1(:,j)/Pc2(:,j)).^(k-1)/k)); % rychlost proudu před vstupem do kola

w1(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc1(:,j).*(1-(Ps1(:,j)/Pc1(:,j)).^(k-1)/k));

Alfa2(:,j) = rad2deg(atan(u(:,j)/w1(:,j))); % vstupní uhel proudu

I(:,j) = (beta(:,j) - Alfa2(:,j)); % uhel náběhu I proudu


```

%% hustotu počítat ze statické teploty
ro2(:,j) = (Ps1(:,j)/(r.*Ts1(:,j))); % hustota vzduchu

zeta(:,j) = (Pc2(:,j) - Pc3(:,j))/((ro2(:,j)/2).*(w2(:,j).^2)); % ztrátový součinitel zeta

% Ts2 = Ts1
% Ps2 = Ps1
Pc3Pocetne(:,j) = Pc2(:,j) - zeta(:,j).*ro2(:,j)/2.*(w2(:,j).^2); % celkový tlak 3

%%
w3(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc1(:,j).*(1+((k-1).*u(:,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(:,j)))).*sqrt(1-
(PbPred(:,j)/(Pc1(:,j).*(1+((k-1).*u(:,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(:,j))).^(k/(k-1))))-
zeta(:,j).*Ps1(:,j).*k./(k-1).*((Pc1(:,j)/Ps1(:,j)).^((k-1)/k).*(1+((k-
1).*u(:,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(:,j))-1))))).^(k-1)/k); % rychlost w3
% Ps3 = pb
% Ps4 = pb
% Tc3 = Tc2
% Alfa3 = beta uhel beta je uhel nastaveni lopatek
Tc4(:,j) = Tc2(:,j).*(Pc4(:,j)/Pc3(:,j)).^((k-1)/k);
% alfa3 = beta

alfa4(:,j) = atand(u(:,j)/(w3(:,j).*cosd(beta(:,j)))-tand(beta(:,j)));

% alfa4OLD(i,j) = rad2deg(atan((u(i,j)/(cos(beta(i,j)).*sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc1(i,j).*(1+((k-
1).*u(i,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(i,j))))).*sqrt(1-(PbPred(i,j)/(Pc1(i,j).*(1+((k-
1).*u(i,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(i,j))).^(k/(k-1))))-eta(i,j).*Ps1(i,j).*k./(k-
1).*((Pc1(i,j)/Ps1(i,j)).^((k-1)/k).*(1+((k-1).*u(i,j).^2)/(2.*k.*r.*Tc1(i,j))-1))))).^(k-
1)/k))))-tan(beta(i,j)))); % nyní vychází stejně

w4(:,j) = sqrt(2.*k./(k-1).*r.*Tc2(:,j).*(Pc4(:,j)/Pc3(:,j)).^((k-1)/k).*(1-
(PbZa(:,j)/Pc4(:,j)).^(k-1)/k));

end
% průměrné hodnoty v jednotlivých krocích délky lopatky
w1Mean = mean(w1,1);
w2Mean = mean(w2,1);
w3Mean = mean(w3,1);
w4Mean = mean(w4,1);
alfa2Mean = mean(Alfa2,1);
Pc4Mean = mean(Pc4,1);
Pc1Mean = mean(Pc1,1);
Ps1Mean = mean(Ps1,1);
alfa4Mean = mean(alfa4,1);

% grafy
figure()

```

```
plot(l, Pc4Mean,'o')  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Celkový tlak P_{c4} [Pa]')
```

```
figure()  
plot(l, alfa4Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Výstupní úhel \alpha_{4} [°]')
```

```
figure()  
plot(l, alfa2Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Vstupní úhel \alpha_{2} [°]')
```

```
figure()  
plot(l, w1Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Absolutní rychlost na vstupu do turbíny w_{1} [m/s]')
```

```
figure()  
plot(l, w2Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Relativní rychlost na vstupu do turbíny w_{2} [m/s]')
```

```
figure()  
plot(l, w3Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Absolutní rychlost na výstupu z lopatkové klece w_{3} [m/s]')
```

```
figure()  
plot(l, w4Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Relativní rychlost na výstupu z lopatkové klece w_{4} [m/s]')
```

```
figure()  
plot(l, Pc1Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Celkový tlak na vstupu P_{c1} [Pa]')
```

```
figure()  
plot(l, Ps1Mean)  
xlabel('Délka lopatky [mm]')  
ylabel('Statický tlak na vstupu P_{s1} [Pa]')
```

II Zdrojový kód k úkolu 2

Kalibrace jednoosá

```
clc;clear;close all;
```

```
NactiDataKalibrace % načte naměřená data
```

```
celkovy_ref = celkovy_refPa + AtmpressurePa; % celkový referenční tlak  
dynamicky_ref = dynamicky_refPa + AtmpressurePa; % dynamický referenční tlak  
celkovy = celkovyPa + AtmpressurePa; % celkový tlak naměřený kalibrovanou sondou  
dynamicky = dynamickyPa + AtmpressurePa; % dynamický tlak naměřený kalibrovanou  
sondou  
Cpm = zeros(0,length(celkovy)); % alokace paměti  
for i = 1: length(celkovy)  
Cpm(i) = ((dynamicky(i) - dynamicky_ref(i))/dynamicky_ref(i)); % určení procenta chyby  
rozdílu dynamických tlaků kalibrované a referenční sondy vydělené dyn. tlakem referenční  
end  
Cpm = Cpm * 100; % chyba v procentech  
m = knnsearch(Cpm',0); % vybere hodnotu nejbližší 0, fce ze Stats Toolbox  
BestAngle = Alpha(m) % uhel, při kterém je chyba nejmenší  
figure() % graf  
plot(Alpha,Cpm)  
hold on  
plot(Alpha(m),Cpm(m),'xr')  
hold off  
xlabel('Uhel \alpha [°]')  
ylabel('Chyba mereni dynamickeho tlaku [%]')
```

Kalibrace v síti

```
clc;clear;close all;
```

```
NactiDataKalibraceSitNove % načte naměřená data
```

```
Pc_ref = pc_refPa + AtmpressurePa; % celkový tlak referenční sondy  
Pd_ref = pd_refPa + AtmpressurePa; % dynamický tlak ref. sondy  
Pc = pcPa + AtmpressurePa; % celkový tlak kalibrované sondy  
Pd = pdPa + AtmpressurePa; % dynamický tlak kalibrované sondy  
Cpm = zeros(0,length(Pc)); % alokace paměti  
for i = 1: length(Pc)  
Cpm(i) = ((Pd(i) - Pd_ref(i))/Pd_ref(i)); % stejný vzorec jako u jednoosé kalibrace  
end  
Cpm = Cpm * 100; % chyba v procentech  
m = knnsearch(Cpm',0); % určí prvek nejbližší k 0, fce ze Stats Toolbox  
BestAlpha = Alpha(m) % uhel alfa, při kterém je chyba nejmenší
```

BestEpsilon = Epsilon(m) % uhel epsilon, při kterém je chyba nejmenší

```
figure() % graf
plot3(Alpha,Epsilon,Cpm)
hold on
xlim([-20 20])
ylim([-20 20])
zlim([-0.3 .2])
daspect([1 1 .1])
plot3(Alpha(m),Epsilon(m),Cpm(m), 'xr')
hold off

j = 0;
g = 1;
for i = 1:length(AtmpressurePa) % rozdělení naměřených dat do sloupců tak, jak probíhalo měření
    if j < 21
        j = j + 1;
        Pd_ref_Razene(j,g) = Pd_ref(i,1);
        PdRazene(j,g) = Pd(i,1);
    else
        j = 1;
        g = g + 1;
        Pd_ref_Razene(j,g) = Pd_ref(i,1);
        PdRazene(j,g) = Pd(i,1);
    end
end

for i=1:length(PdRazene) % v každém sudém sloupci potřeba přehodit pořadí prvků, aby ubíhaly stále ve stejném směru
    if mod(i,2) == 0
        Pd_ref_Razene(:,i) = flip(Pd_ref_Razene(:,i));
        PdRazene(:,i) = flip(PdRazene(:,i));
    end
end

[Pd_ref_Grid, PdGrid] = meshgrid(Pd_ref_Razene,PdRazene);
CPM = ((PdGrid - Pd_ref_Grid) ./ Pd_ref_Grid);
CPM = CPM * 100; % v procentech

[AlphaGrid, EpsilonGrid] = meshgrid(Alpha,Epsilon);

figure() % graf
surf(AlphaGrid,EpsilonGrid,CPM)
hold on
plot3(Alpha(m), Epsilon(m),Cpm(m), 'xr')
```

```
shading interp  
xlabel('uhel \alpha')  
ylabel('uhel \epsilon')  
zlabel('Velikost chyby [%]')  
xlim([-20 20])  
ylim([-20 20])  
zlim([-3 .2])  
daspect([1 1 .1])  
% view(0,0)  
caxis([-2 0])  
hold off
```

III Zdrojový kód k úkolu 3

```
%%  
clear;clc;close all;  
load HWA_Var.mat % načtení dat  
r = size(a,1);  
for i = 1:r % vyhlazení signálu v okolí nuly na nulu  
    if (c(i,1) < 0.4)  
        c(i,1) = 0;  
    end  
end  
plot(a,c) % vykreslení grafu napětí na čase  
hold on  
m = find(c > 0.5 & c < 2.4); % najde indexy osy y (napětí), které odpovídají podmínce a uloží  
je do množiny m  
  
A = zeros(size(m,1),1);  
C = zeros(size(m,1),1);  
for j = 1:size(m,1)  
    A(j) = a(m(j,1),1); % do množ. A se uloží hodnoty vektoru a (osy x - času), které  
odpovídají indexům z množiny m  
    % A = A'; % transpozice  
    C(j) = c(m(j,1),1); % do množ. C se uloží hodnoty vektoru c (osy y - napětí), které  
odpovídají indexům z množiny m  
    % C = C'; % transpozice  
    W(j) = w(m(j,1),1);  
end  
plot(A,C, '*r') % vykreslí body na hranách, kde se napětí pohybuje mezi 0,5 a 2,4 V  
xlabel('čas [s]')  
ylabel('Napětí [V]')  
title('Průběh napětí na čase')  
l = 1;  
g = 1;  
R = zeros(size(m,1),1);  
S = zeros(size(m,1),1);  
for j = 1:(size(m,1)-1)  
    R(l,g) = a(m(j,1),1); % matice R obsahuje hodnoty a (osy x - čas), které odpovídají  
podmínce
```

```
S(l,g) = c(m(j,1),1); % matice S obsahuje hodnoty c (osy y - napětí), které odpovídají  
podmínce  
l = l + 1;  
  
if ((m(j+1,1) - m(j,1)) > 1000) % pokud rozdíl mezi indexy množiny m je větší než 1000,  
potom začni nový sloupec - rozdělení dat na náběžných hranách do společných sloupců  
    g = g + 1;  
    l = 1;  
end  
end  
  
j = 1;  
Sdiff = diff(S); % rozdíl sousedních napětí  
l = 1;  
g = 1;  
for j = 1:size(Sdiff,2) % prochází diff matici a vynechává indexy, které jsou záporné  
    for i = 1 : 6  
        if Sdiff(i,j) > 0  
            P(l,g) = S(i,j); % osa y - hodnoty napětí, takto získám dvě nové matice, které obsahují  
informace jen na náběžných hranách  
            Q(l,g) = R(i,j); % osa x - čas  
            l = l + 1 ;  
        end  
    end  
    g = g + 1;  
    l = 1;  
end  
l = 1;  
g = 1;  
T = zeros(6,57); % alokace paměti  
for j = 1:length(Q)  
    for i = 2:size(P,1)  
        if (P(i,j) > 1.5)  
            T(l,g) = Q(i-1,j) + (((Q(i,j) - Q(i-1,j))*(1.5 - P(i-1,j)))/(P(i,j) - P(i-1,j))); % počítá čas,  
kdy napětí je rovno 1.5 V  
            g = g + 1;  
        end  
    end  
    l = l + 1;  
    g = 1;  
end  
l = 1;  
T = T.'; % transpozice  
  
TT = T(1,:); % vybere první hodnoty, které splnily podmínku. Ty jsou nejpřesnější  
l = 1;  
  
TT = TT.';  
Perioda = diff(TT); % rozdíl sousedních časů = perioda  
l = 1;
```

```
Fr = zeros(1,length(Perioda));
for i = 1:length(Perioda)
    Fr(i) = (1/Perioda(i)); % převrácená hodnota periody = frekvence
    l = l + 1;
end
sum = 0;
for i = 1:length(Fr)
    sum = sum + Fr(i);
end
AvgFr = sum/length(Fr);
AVGFr = mean(Fr) % střední hodnota frekvence
%%
r = 1;
s = 1;
for i = 1:(size(m,1)-1) % Rozděluje indexy osy y - napětí, které vyhovují podmínce, větší než
0,5, ale menší než 2,4, kde krok je větší než 100, do sloupců
    X(r,s) = m(i);
    if (m(i+1) - m(i)) > 100
        s = s + 1;
        r = 0;
    end
    r = r + 1;
end
XX = X(1,:); % uložení prvního řádku
XX = XX';

r = 2;
Z(1) = XX(1);
for i = 2:size(XX,1) % pokud je sousední index od současného vzdálené o více než 1000,
uloží se
    if (XX(i) - XX(i-1)) > 1000
        Z(r) = XX(i);
        r = r + 1;
    end
end

ZZ = [1, Z, m(size(m,1))]; % uložení všech indexů
ZZ = ZZ';
s = 1;

for i = 1:(size(ZZ,1)-1) % vytvoření pole, kam se uloží veškeré naměřené rychlosti
odpovídající indexu Z
    if i == 1
        Zac = ZZ(i);
        Kon = ZZ(i+1);
        T_W{i} = w(Zac:Kon);
    else
        Zac = ZZ(i) + 1;
        Kon = ZZ(i+1);
        T_W{i} = w(Zac:Kon);
    end
end
```

```
end
end
%%
T_W_vel = zeros(1,(size(T_W,2)-1));
for i = 1:(size(T_W,2)-1) % zjišťovány délky řetězců rychlostí (nekonstantní číslo), poslední
    byl vynechán, velmi krátký
    T_W_vel(i) = size(T_W{i},1);
end
MinVel = min(T_W_vel); % zjištění minimální délky řetězce
T_W_Zkraceno = cell(1,(size(T_W,2)-1));
for i = 1:(size(T_W,2)-1) % zkrácení všech rychlostních řetězců na číslo minimálního
    T_W_Zkraceno{i} = T_W{i}(1:MinVel);
end
T_W_Sectenno = zeros(MinVel,size(T_W_Zkraceno,2));
for i = 1:size(T_W_Zkraceno,2)
    T_W_Sectenno(:,i) = T_W_Zkraceno{i};
end

StrHodnotyZBodu = mean(T_W_Sectenno,2); % Zprůměrování rychlostí jednotlivých bodů
StrHodRychlosti = mean(StrHodnotyZBodu,1) % Střední hodnota z průměrných hodnot
rychlostí
```

IV Zdrojový kód k úkolu 4

```
clear; clc; close all
load 3OtvorovaSonda

A = SKolem1600; % Načtení dat - podle potřeby jeden "zkomentovat"
% A = BezKola1600; % Načtení dat - podle potřeby jeden "zkomentovat"
ps = (A.AtmpressurePa); % atmosférický tlak ref. sondy
pd = ps + (A.pDPa); % dynamický tlak ref. sondy
pc = ps + (A.pCPa); % celkový tlak ref. sondy
p1 = ps + (A.p1stredPa); % tlak ze středního odběru
p2 = ps + (A.p2levaPa); % tlak z levého odběru
p3 = ps + (A.p3pravaPa); % tlak z pravého odběru
alpha = (A.Alpha); % úhel natočení kolem osy
p = 0.5*(p2 + p3); % střední tlak mezi pravým a levým otvorem

C_stat = (p1 - ps)/(p1 - p); % výpočet koef. C stat
C_celk = (p1 - pc)/(p1 - p); % výpočet koef. C celk
C_alpha = (p2 - p3)/(p1 - p); % výpočet koef. alfa

figure()
plot(alpha, C_stat)
xlabel('úhel \alpha')
ylabel('Koeficient statického tlaku C^{stat}')
title('Závislost koeficientu C^{stat} na úhlu natočení \alpha')

figure()
```



```
plot(alpha, C_celk)
xlabel('úhel \alpha')
ylabel('Koeficient celkového tlaku C^{celk}')
title('Závislost koeficientu C^{celk} na úhlu natočení \alpha')
```

```
figure()
plot(alpha, C_alpha)
xlabel('úhel \alpha')
ylabel('Koeficient úhlu C^{alpha}')
title('Závislost koeficientu C^{alpha} na úhlu natočení \alpha')
```

```
%%
```

```
ro = 1.225; % kg*m^-3
```

```
w = sqrt(2*(pc-ps)/ro); % výpočet rychlosti z malých dat
```

```
w_str = mean(w) % střední hodnota rychlosti
```

V Zdrojový kód k úkolu 5

```
clear; clc; close all
```

```
load 3OtvorovaSondaPrim
```

```
A = BezKola1600Prim; % Načtení dat - podle potřeby jeden "zkomentovat"
```

```
% A = SKolem1600Prim; % Načtení dat - podle potřeby jeden "zkomentovat"
```

```
DATA = A.p3pravaPa(A.Alpha==0); % naměřený tlak z pravého odběru pod úhlem 0°
```

```
% DATA = A.p1stredPa(A.Alpha==0.99); % naměřený tlak ze středního odběru pod úhlem 0,99°
```

```
%% Statistika
```

```
figure()
```

```
hold on; grid on; box on
```

```
histfit(DATA) % histogram
```

```
xlabel('Hodnoty naměřených dat')
```

```
ylabel('Četnost hodnot')
```

```
title('Graf četnosti dat, křivka normálního rozdělení')
```

```
line([mean(DATA) mean(DATA)], [0 60], 'color', 'g') % čára vyznačující střední hodnotu
```

```
line([median(DATA) median(DATA)], [0 60], 'color', 'c', 'linestyle', '-.') % čára vyznačující medián
```

```
line([mean(DATA)+std(DATA) mean(DATA)+std(DATA)], [0 60], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5)
```

```
% čára jedné směrodatné odchylky od střední hodnoty vlevo
```

```
line([mean(DATA)-std(DATA) mean(DATA)-std(DATA)], [0 60], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5) %
```

```
čára jedné směrodatné odchylky od střední hodnoty vpravo
```

```
line([mean(DATA)+2*std(DATA) mean(DATA)+2*std(DATA)], [0 60], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5) % čára dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty vlevo
```

```
line([mean(DATA)-2*std(DATA) mean(DATA)-2*std(DATA)], [0 60], 'color', 'k', 'linewidth', 1.5) % čára dvou směrodatných odchylek od střední hodnoty vpravo
```

```
line([mean(DATA)+3*std(DATA) mean(DATA)+3*std(DATA)],[0  
60],'color','k','linewidth',1.5) % čára tří směrodatných odchylek od střední hodnoty vlevo  
line([mean(DATA)-3*std(DATA) mean(DATA)-3*std(DATA)],[0  
60],'color','k','linewidth',1.5) % čára tří směrodatných odchylek od střední hodnoty vpravo
```

```
legend('histogram','křivka normálního rozložení','střední hodnota','medián')
```

```
prumer_dat = mean(DATA) % střední hodnota  
median_dat = median(DATA) % medián  
modus_dat = mode(DATA) % modus - nejčastější hodnota  
SdOdchylka = std(DATA) % směrodatná odchylka  
rozptyl = var(DATA) % rozptyl  
sikmost = skewness(DATA) % šikmost  
spicatost = kurtosis(DATA) - 3 % špičatost
```

```
figure() % vykreslení sloupcového grafu s proloženým polynomem 3. řádu  
hist(DATA)  
xlabel('Unikátní hodnoty naměřených dat')  
ylabel('Četnost hodnot')  
title('Četnost naměřených dat')
```

```
x = 1:size(DATA,1);  
x = x';  
p = polyfit(x,DATA,3);  
x1 = x;  
y1 = polyval(p,x1);  
figure()  
plot(x,DATA,'o')  
hold on  
plot(x1,y1)  
xlabel('Pořadí bodů')  
ylabel('Relativní hodnoty tlaků vůči atmosférickému')  
title('Interpolace naměřenými hodnotami')  
legend('naměřené body', 'polynomická interpolace 3. řádu' )  
hold off
```

```
%% vypočet rychlosti velkých dat  
ro = 1.225; %kg*m^-3  
ps = A.AtmpressurePa; % atmosférický tlak  
pc = A.AtmpressurePa + A.pCPa; % celkový tlak  
Q = (pc-ps); % dynamický tlak  
w = sqrt(2*(pc-ps)/ro); % výpočet rychlosti  
w_str = mean(w) % střední hodnota rychlosti
```