

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

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

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Nejistota měření vazebních aerodynamických sil

Autor: **Jan Müller**
Vedoucí práce: **Prof. Ing. Jiří Linhart, CSc.**
Konzultant: **Ing. Ladislav Tajč, CSc.**

Akademický rok 2014/2015

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, CSc. a konzultantovi Ing. Ladislavu Tajčovi, CSc. za poskytnuté konzultace, materiály a odborné rady, bez kterých by tato práce nemohla vzniknout. Dále děkuji Ing. Jiřímu Hruškovi za poskytnuté technické informace o experimentálním zařízení. Také bych rád poděkoval své rodině, přítelkyni a přátelům za podporu během celého studia.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Müller	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	B2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Linhart, CSc.	Jméno Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Nejistota měření vazebních aerodynamických sil		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	54	TEXTOVÁ ČÁST	42	GRAFICKÁ ČÁST	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato práce se zabývá vyšetřováním nejistot měření tlaku, teploty, hmotnostního průtoku a rychlosti v aerodynamickém tunelu, který je v práci popsán. Z tohoto důvodu práce také obsahuje úvod do problematiky nejistot měření a vyšetření schémat měřicích řetězců. Odhad nejistoty měření byl proveden pro konkrétní odměřený případ.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Nejistota měření, odhad, měřicí řetězec, aerodynamický tunel, přístrojová nejistota</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Müller	Name Jan	
FIELD OF STUDY	B2301R016 “Design of Power Machines and Equipment“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Linhart, CSc.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Measurement uncertainty of aerodynamic coupling forces		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Power System Engineering	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	54	TEXT PART	42	GRAPHICAL PART	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This thesis focuses on the investigation of measurement uncertainty for pressure, temperature, mass flow and velocity in wind tunnel, which is described in thesis too. There are also introduction to the issue of measurement uncertainty and investigation of measuring chains in this thesis. The estimate of measurement uncertainty was applied to the specific measurement.
KEY WORDS	measurement uncertainty, estimate, measuring chain, wind tunnel, instrumental uncertainty

Obsah

Úvod	9
1 Chyby měření	10
1.1 Klasifikace chyb měření	10
1.1.1 Chyba absolutní a relativní	10
1.1.2 Systematické chyby	10
1.1.3 Náhodné chyby	10
1.1.4 Hrubé chyby	11
1.1.5 Výsledná chyba	11
1.1.6 Chyby dle svého zdroje	11
2 Nejistoty měření	12
2.1 Zdroje nejistot	13
2.2 Typy nejistot	13
2.3 Vyhodnocení standardních nejistot typu A	14
2.4 Vyhodnocení standardních nejistot typu B	14
2.5 Kombinované a rozšířené nejistoty	15
3 Stanovení standardních nejistot při přímém měření	16
3.1 Výpočet standardní nejistoty typu A	16
3.2 Výpočet standardní nejistoty typu B	16
3.2.1 Rámcový postup	16
3.2.2 Známé U a k_r	17
3.2.3 Známé rozpětí normálního rozdělení	17
3.2.4 Známé hranice vlivu zdroje	17
3.2.5 Použití číslicového měřicího přístroje	19
3.2.6 Použití analogového měřicího přístroje se stupnicí	19
3.2.7 Přítomnost hystereze	19
3.3 Standardní kombinovaná nejistota	19
3.4 Rozšířená nejistota	19
4 Stanovení standardních nejistot při nepřímém měření	20
4.1 Postupy určování	20
4.2 Kovariance při určování výsledných nejistot	20
4.2.1 Kovariance a nejistoty	20
4.2.2 Stanovení kovariance metodou typu A	21
4.2.3 Stanovení kovariance metodou typu B	21
5 Experimentální zařízení	22
6 Měření tlaku na cloně	23
6.1 Diference tlaku před a za clonou	23
6.1.1 Standardní nejistota typu B pro DTS BHV 5355	24
6.1.2 Standardní nejistota typu B pro NI PXI 4472B	25
6.1.3 Výsledná standardní nejistota typu B	26
6.2 Diference tlaku před clonou a barometrickým tlakem	27

7	Měření teploty proudícího média za clonou	27
7.1	Standardní nejistota typu B pro Pt100	28
7.2	Standardní nejistota typu B pro PP200	29
7.3	Standardní nejistota typu B pro rezistor	30
7.4	Standardní nejistota typu B pro NI PXI 4472B	31
7.5	Výsledná standardní nejistota typu B	31
8	Měření hmotnostního průtoku centrickou clonou	32
8.1	Nejistota měření hmotnostního průtoku clonou	35
9	Měření rychlosti proudícího vzduchu v měřicím prostoru	36
9.1	Nejistota měření rychlosti proudícího vzduchu v měřicím prostoru . . .	37
	Závěr	39
	Literatura	40
	Seznam obrázků	41
	Seznam tabulek	41
	Příloha A Hodnoty měření	42
	Příloha B Bilanční tabulky	43
	Příloha C Algoritmus pro výpočet hmotnostního průtoku	45
	Příloha D Technická specifikace DTS BHV 5355	47
	Příloha E Technická specifikace programovatelného převodníku teploty PP200	49
	Příloha F Technická specifikace měřicí karty NI PXI 4472B	51

Úvod

Současná doba 21.století není příliš nakloněna experimentálním měřením a vyhodnocování takto pořízených dat. To je dáno především finanční náročností těchto měření a nejisté kvalitě získaných výsledků. Je zde tedy snaha provádět tato měření co nejefektivněji a zároveň s věrohodnými výsledky. Stále častěji se proto můžeme setkat s pojmem nejistota měření. Zatímco v oblasti kalibrace a vrcholové metrologie pojem a celá problematika nejistot měření již pevně zakotvily, do každodenní praxe průmyslových měření jsou teprve postupně zaváděny. Uplatňování konceptu nejistot měření také nahrává fakt, že se tento pojem stále častěji objevuje v mezinárodních normách, jako příklad může být uvedena certifikace dle ISO 9000.

Předkládaná práce vznikla z jisté obavy věrohodnosti vyhodnocování měření na experimentálním zařízení, které je umístěno v laboratoři na Katedře energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni. Následující text by měl čtenáře uvést do problematiky nejistot měření a vysvětlit rozdíl mezi dříve používanými chybami měření. Dále by se měl čtenář seznámit se základními metodami a postupy při vyšetřování odhadu nejistoty měření. Stanovení odhadu nejistoty měření s sebou nese i nutnost sestavení schémat měřicích řetězců. Měřicí řetězec si lze představit jako trasu, kterou musí zpracovávaný signál urazit, než je vyhodnocen. S nabytými znalostmi bude aplikován odhad nejistoty měření na konkrétní odměřený případ, kterým je měření číslo 1959, viz Obr. 13 v příloze.

Cílem této práce by mělo být stanovení odhadu nejistot měření základních veličin, které se objevují při měření vazebních aerodynamických sil, jedná se zejména o teplotu, tlak, rychlost a hmotnostní průtok. Dalším přínosem by mohlo být případné zjištění nedostatků ve zpracování signálu a nápadů na jejich odstranění.

1 Chyby měření

Mezi základní způsoby získávání kvantitativních informací o stavu dané veličiny patří měření. Můžeme říci, že v praxi nejsou žádný přístroj, žádné měření ani žádná měřicí metoda absolutně přesné. Vlivem těchto omezení a proměnnosti měření nedojde ani u homogenního materiálu, kde je skutečná hodnota měřené veličiny konstantní, k získání stejných výsledků. Proto je výsledkem každého měření náhodná veličina, ve které je kromě samotné informace obsažen také šum, tj. chyba měření. Výsledek měření se tedy vždy nachází v určitém intervalu ("tolerančním poli") kolem skutečné hodnoty, bohužel téměř nikdy nedojde k ideálnímu ztotožnění obou hodnot.

1.1 Klasifikace chyb měření

Po dlouhou dobu bylo zvykem pracovat při vyhodnocování souborů naměřených hodnot s chybami. Chyby mohou být vyjádřeny v absolutních nebo relativních hodnotách. Chyby lze podle příčin vzniku rozdělit na systematické, náhodné a hrubé. Podle svého zdroje je lze dělit na chyby přístroje, metody, pozorování a vyhodnocení.

1.1.1 Chyba absolutní a relativní

Chyba absolutní Δ_x je vyjádřena rozdílem mezi hodnotou naměřenou x_m a hodnotou skutečnou x_s . Po vydělení absolutní chyby skutečnou hodnotou, dostaneme poměrné vyjádření chyby, tj. chybu relativní δ_x , ta se také někdy uvádí v procentech. Platí tedy

$$\Delta_x = x_m - x_s, \quad (1)$$

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x_s} = \frac{x_m - x_s}{x_s}. \quad (2)$$

1.1.2 Systematické chyby

Tyto chyby působí na výsledek měření předvídatelným dojmem. Při stálých podmínkách jsou co do velikosti i znaménka také stálé. Systematické chyby, které zvyšují nebo snižují hodnotu všech měření o konstantu, se nazývají konstantní systematické chyby. Navenek se často neprojevují a lze je odhalit až po porovnání výsledků měření z jiného přístroje. Dále existují systematické chyby, které jsou funkcí času, to je způsobeno stárnutím nebo opotřebením měřicího přístroje.

Systematické chyby lze ve většině případů určit a jejich vliv na výsledek je možné zmenšit pomocí korekcí, kompenzací apod. Pro stanovení velikostí těchto chyb zpravidla stačí vztah (1).

Nevyloučená (nevylučitelná) systematická chyba je zbytek negativního vlivu na měření, který se nepodaří odstranit jedním ze způsobů zmíněných výše.

1.1.3 Náhodné chyby

Jak název napovídá tyto chyby působí zcela nahodile, nedají se předvídat a jejich vliv nelze vyloučit, lze ho jen omezit. Při opakovaných měřeních se mění jejich velikost i znaménko. Při jejich určování se vychází z opakovaných měření za použití statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu rozdělení příslušné náhodné

chyby.

V praxi se ve většině aplikací používá rozdělení normální - Gaussovo.

Výsledek měření, určený ze souboru opakovaných měření uskutečněných za stejných podmínek, je reprezentován aritmetickým průměrem získaným při n opakováních z hodnot $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, tj.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3)$$

Náhodná chyba je nejčastěji zastoupena směrodatnou odchylkou výběrového souboru s , zřídka směrodatnou odchylkou aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$. Obě směrodatné odchylky blíže charakterizují chování náhodných chyb. Získáme je ze vztahů

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (4)$$

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}. \quad (5)$$

1.1.4 Hrubé chyby

Zcela nevyzpytatelné jsou hrubé chyby, měření zatížena takovou chybou zcela znehodnotí celý experiment. Dají se ale snadno rozpoznat, protože výsledky měření se výrazně liší od ostatních, což je velmi často projevem tohoto druhu chyby, tyto výsledky jsou vyloučeny z dalšího zpracování. Hrubé chyby jsou způsobeny zvláštní příčinou, náhlým selháním měřicí aparatury, nesprávným záznamem výsledku apod. Jejich výskyt se dá omezit striktním dodržováním příslušných měřicích postupů, podmínek měření a pozorností obsluhy.

1.1.5 Výsledná chyba

Výsledná chyba měření je vyjádřena jako součet systematické a náhodné složky, to je možné zapsat

$$\Delta_x = e + \varepsilon, \quad (6)$$

a její maximální hodnotu lze odhadnout jako

$$\Delta_{xmax} = (\bar{x} - x_s) + 2s, \quad (7)$$

kde systematická složka $e = \bar{x} - x_s$ a náhodná složka $\varepsilon = s$, popř. $\varepsilon = 2s$. Součinitel rozšíření směrodatné odchylky souvisí s typem rozdělení a pravděpodobností pokrytí intervalu. Hodnota dva u Gaussova rozdělení přísluší často užívané 95% pravděpodobnosti.

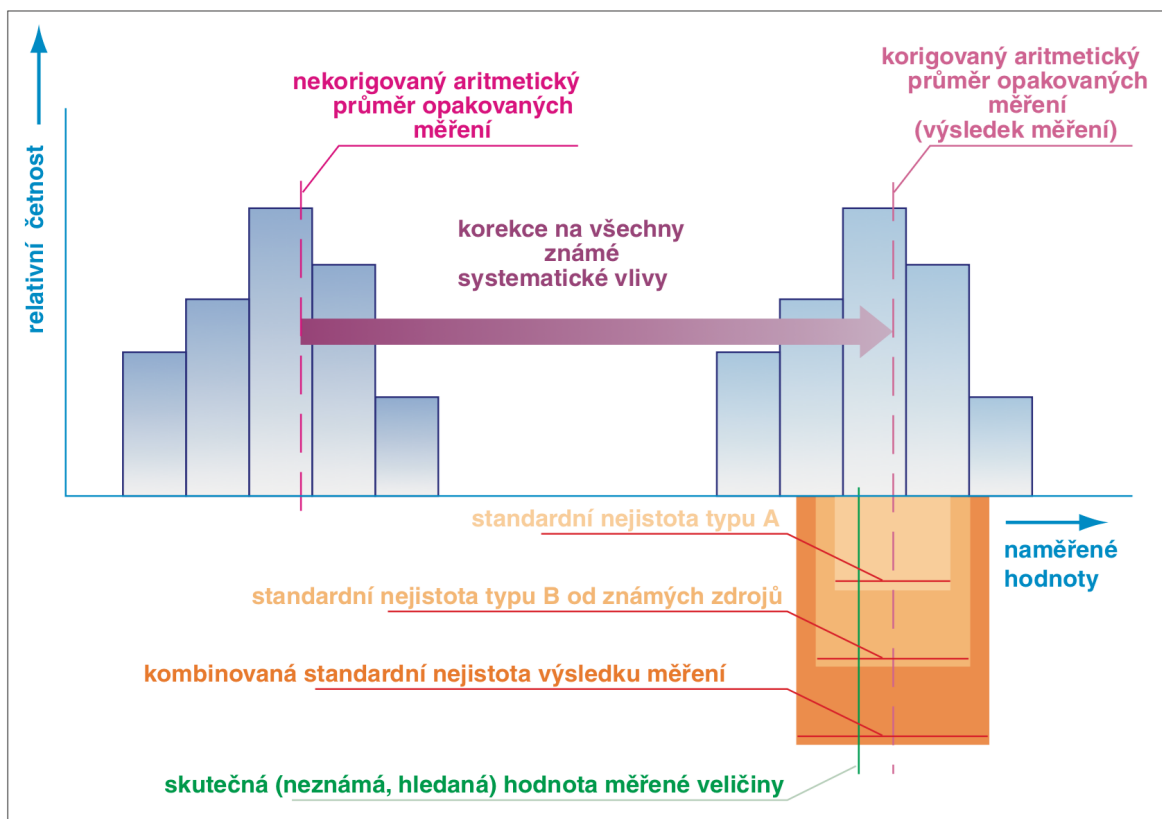
1.1.6 Chyby dle svého zdroje

- **Chyby přístroje** neboli instrumentální chyby jsou způsobeny nedokonalostmi použitého měřicího přístroje. Mohou vznikat ve výrobě, montáži, případně i opotřebením. Svoji roli zde má také stáří přístroje. U většiny přístrojů jsou jejich chyby známy a garantovány výrobcem. Dalším zdrojem chyby může být špatná instalace nebo uložení na pracovním místě.

- **Chyby metody** vznikají s nedokonalostí či zjednodušením použité měřicí metody. Mohou být způsobeny odečítáním dat, organizací měření, eliminací vnějších vlivů apod.
- **Chyby pozorování**, nebo spíše chyby pozorovatele, jsou do měření zanášeny jako chyby osobní, mají přímou souvislost s osobou, která měření provádí. Jejich příčinou může být nedokonalost smyslů pozorovatele nebo jeho nesoustředěnost při měření.
- **Chyby vyhodnocení** jsou chyby numerické. Vznikají použitím nevhodných statistických metod, aplikováním přibližných vztahů, přílišným zjednodušením, použitím linearizace, interpolace, extrapolace, zaokrouhlováním, nedostatečným vyčíslením konstant apod.

2 Nejistoty měření

Parametrem, který bezprostředně souvisí s výsledkem měření, je nejistota měření. Nejistota měření vymezuje interval, v němž se bude s určitou pravděpodobností nacházet skutečná hodnota měřené veličiny. V nejistotách měření jsou ukryty všechny nedokonalosti stanovení výsledku měření, jež budou blíže přiblíženy v kapitole 2.1.



Obrázek 1: Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření [3]

Na obrázku výše je znázorněna situace typického rozložení naměřených hodnot měřené veličiny.

2.1 Zdroje nejistot

Jakýkoliv jev, který nějakým způsobem může ovlivnit neurčitost jednoznačného určení výsledku měření a tím vzdalovat naměřenou hodnotu od skutečné, je označován jako zdroj nejistoty měření. Zdroje nejistot se také liší s použitím přímých nebo nepřímých metod měřících metod. Dále na nejistoty působí výběr měřících přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů, vzorkovačů a dalších prostředků v celé trase přenosu, úpravy a zpracování měřicího signálu. Na nejistotách se také velmi výrazně podílí rušivé vlivy prostředí. Uvést zde všechny možné zdroje nejistot nelze, proto budou uvedeny alespoň ty, které se vyskytují nejčastěji:

- nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost, vzorkovací schopnost atd.)
- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních
- nevhodný (nereprezentativní) výběr vzorků měření
- nevhodný postup při měření
- subjektivní vlivy obsluhy
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí
- linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení
- přílišné zjednodušení (zaokrouhlení) konstant a převzatých hodnot.

Některé typy zdrojů nejistot se projevují výhradně či výrazněji při určování nejistot metodou typu A, jiné za použití metody typu B. Většina zdrojů může být ale příčinou obou skupin nejistot, zde je právě ukryto největší nebezpečí, v podobě opomenutí jedné ze složek, což by mohlo mít velmi výrazný zkreslující efekt.

2.2 Typy nejistot

Každá nejistota se skládá z několika dílčích nejistot (složek). Pro určení jejich velikosti se principiálně využívají dvě metody:

- metoda typu A - statistické zpracování naměřených údajů
- metoda typu B - jiné než statistické zpracování naměřených údajů.

Někdy se také můžeme setkat se stručnějším označením nejistota typu A, pro nejistotu získanou metodou A, obdobně nejistota typu B získaná metodou B. Pomocí součtu čtverců těchto základních nejistot lze snadno určit výslednou nejistotu kombinovanou. Celá metodika určování nejistot je značně komplikovaná, proto bude nejprve přiblížena jen základní metodika, která bude dále v textu podrobněji vysvětlena. Za předpokladu, že máme jednoduchou výstupní funkci s několika vstupními parametry

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m), \quad (8)$$

kde y je odhad výstupní veličiny, x_i odhady veličin vstupních, f známý funkční vztah. Nejistotu u_y odhadu y lze poté v nejobecnějším pojetí vyjádřit vztahem

$$u_y = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_i^2 \cdot u_{xy}^2}, \quad (9)$$

kde u_{xy} jsou jednotlivé složky nejistot, A_i je koeficient citlivosti (převodu) příslušného zdroje nejistoty, ten je buď znám, nebo se určí jako parciální derivace funkce y podle příslušné vstupní veličiny x_i

$$A_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} = \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)}{\partial x_i}. \quad (10)$$

2.3 Vyhodnocení standardních nejistot typu A

Jak již bylo zmíněno dříve, metoda typu A vychází ze statistického vyšetření opakované série měření. Pro n nezávislých pozorování za stejných podmínek ($n > 1$) bude konečný odhad nejistoty y reprezentován aritmetickým průměrem výběrového souboru, spočteného stejně jako v teorii chyb ze vztahu (3). Využitím vztahu (4) můžeme stanovit směrodatnou odchylku, která slouží k určení nejistoty příslušné k odhadu y . Tento způsob je hodně podobný určování náhodné chyby, nejistota je zpravidla značena u_{Ay} a s užitím vztahu (5) lze psát

$$u_{Ay} = s_{\bar{y}} = \frac{s_y}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (11)$$

Protože se jedná o nejistotu způsobenou kolísáním naměřených údajů, je při malém počtu měření ($n < 10$) nejistota určená pomocí vztahu (11) málo spolehlivá. V takovém případě by bylo vhodnější odhadnout tuto nejistotu metodou typu B, která využívá jiných než současně naměřených hodnot.

2.4 Vyhodnocení standardních nejistot typu B

Při vyhodnocování těchto nejistot se využívá jiných než statistických přístupů. Standardní nejistoty typu B jsou odhadovány za pomoci racionálního úsudku, který je založen na všech možných dostupných informacích. Nejčastěji se jedná o tyto informace:

- zkušenosti z předchozích měření

- nejistoty referenčních údajů v příručkách
- údaje výrobce měřicí techniky
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a měřicí techniky.

Při sestavování nejistoty typu B se využívá dílčích nejistot jednotlivých zdrojů u_{Bz_j} . Za předpokladu, že je známa maximální odchylka j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , pak se nejistota u_{Bz_j} určí dle vztahu

$$u_{Bz_j} = \frac{z_{jmax}}{k}, \quad (12)$$

k je součinitel vyplývající ze zákona rozdělení, podle kterého se daný zdroj nejistoty chová. Pro normální rozdělení je $k = 2$, popř. 3, pro rovnoměrné pak $k = 1,73$. Někdy už ale může být přímo známa hodnota standardní nejistoty u_{Bz_j} , např. z kalibračního certifikátu měřidla apod. Výsledná nejistota určená metodou typu B se pak pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_p$ určí ze vztahu

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{i=1}^p A_j^2 u_{Bz_j}^2}, \quad (13)$$

kde u_{Bz_j} jsou nejistoty jednotlivých zdrojů a A_j jejich součinitele citlivosti. Nejistota typu B je tímto převedena do zcela nové podoby a také nabývá charakteru směrodatné odchylky. V tomto tvaru, případně ve druhé mocnině jako s rozptylem se s nimi i dále pracuje.

2.5 Kombinované a rozšířené nejistoty

Protože se v praxi běžně nevystačí s jedním či druhým typem nejistot, stanovuje se výsledná kombinovaná nejistota u_{Cy} . Výsledný efekt je určen jako odmocnina ze součtu čtverců dílčích nejistot

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2}. \quad (14)$$

Dále může nastat také situace, kdy standardních nejistoty nestačí a je nutné použít jejich rozšířené formy pomocí koeficientu k_r . Standardní nejistota zaujímá při použití normálního rozdělení interval určený s pravděpodobností asi 68%. Pokud má být dosaženo intervalu s lepším pravděpodobnostním pokrytím blízcího se 100%, standardní nejistota musí být rozšířena koeficientem k_r , kde $k_r = 2$ pro rozšíření na 95% a $k_r = 3$ pro rozšíření na 99,7% pravděpodobnosti apod. Poté platí

$$U = k_r \cdot u, \quad (15)$$

kde U je rozšířená nejistota, k_r koeficient rozšíření a u standardní nejistota.

3 Stanovení standardních nejistot při přímém měření

3.1 Výpočet standardní nejistoty typu A

Tento výpočet je opět založen na statistické analýze naměřených hodnot. Využívá se běžných statistických metod pro zpracování naměřených hodnot, které byly získány opakovanými měřeními, kterých by mělo být nejméně deset. Platí zde předpoklad, že tato měření jsou navzájem nezávislá a byla provedena za stejných podmínek. K dispozici je tedy n naměřených údajů $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$, které jsou výsledkem provedení n nezávislých měření jedné veličiny. Poté je odhad hodnoty měřené veličiny reprezentován aritmetickým průměrem

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (16)$$

Standardní nejistota typu A tohoto výsledku je rovna směrodatné odchylce aritmetického průměru $s_{\bar{x}}$, značí se $u_A(x)$ a platí

$$u_A(x) = s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (17)$$

Tento vztah pro výpočet nejistoty lze však použít jen tehdy, byl-li proveden dostatečný počet měření ($n \geq 10$). Pro malý počet měření ($n < 10$), kdy je měřící proces statisticky řízen a kdy je k dispozici tzv. průřezový rozptyl, který udává rozptýlení řízeného měřicího procesu, se standardní nejistota typu A určí ze vztahu

$$u_A(x) = \frac{s_{pr}}{\sqrt{n}}, \quad (18)$$

s_{pr}^2 je známý průřezový rozptyl a n počet měření.

3.2 Výpočet standardní nejistoty typu B

3.2.1 Rámcový postup

Nejistoty typu B jsou spjaty se známými, identifikovatelnými a kvantifikovatelnými zdroji. Vyhodnocení nejistoty typu B vychází z kvalifikovaného úsudku, který je založen na všech dostupných údajích o měřené veličině X a jejích možných změnách. Jako zdroje těchto údajů, potřebných k určení nejistoty typu B, mohou posloužit:

- předchozí měření a jejich výsledky
- údaje z certifikátů, kalibračních listů, ověřovacích listů apod.
- nejistoty referenčních údajů převzatých z různých pramenů
- zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicích prostředcích a podmínkách měření
- informace o měřicích prostředcích a podmínkách jejich použití získané od výrobců.

Ocenění a využití těchto informací do jisté míry závisí na zkušenosti obsluhy, na hloubce všeobecných znalostí i na rutině a praxi experimentátora.

Nyní k samotnému rámcovému postupu při určování nejistot typu B:

1. Vytipování možných zdrojů nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p$, jak bylo uvedeno v předešlém textu.
2. Určení standardní nejistoty vlivem každého zdroje buď převzetím z certifikátů, technické dokumentace, tabulek, technických norem, kalibračních listů apod., nebo odhady pomocí metod uvedených dále v textu.
3. Posouzení korelací mezi jednotlivými zdroji.
4. Určení vztahu mezi veličinou X a jednotlivými zdroji nejistot $Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p$,

$$X = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_j, \dots, Z_p). \quad (19)$$

5. Vypočítání nejistoty $u_B(x)$ pro funkci (19) s použitím zákona šíření nejistot.

Pokud není známa přímo standardní nejistota vlivem příslušného zdroje, nastávají různé situace, ty nejčastější jsou uvedeny v následujících kapitolách.

3.2.2 Známé U a k_r

Je-li z certifikátů, dokumentace od výrobce nebo jiného pramenu známa rozšířená nejistota U a koeficient rozšíření k_r , stanovení standardní nejistoty $u_B(z_j)$ vlivem daného zdroje Z_j vychází ze vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_r}. \quad (20)$$

3.2.3 Známé rozpětí normálního rozdělení

Pokud je známo rozpětí (délka intervalu $2U$), v němž se může nacházet většina naměřených hodnot (např. 95%, 99% nebo 99,73%), a platí, že při určování tohoto intervalu bylo uvažováno normované normální rozdělení, lze standardní nejistotu $u_B(z_j)$ vlivem daného zdroje Z_j určit ze vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_p}, \quad (21)$$

kde k_p je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení pro pravděpodobnost P ($k_p = 1,96$ pro $P = 95\%$, $k_p = 2,58$ pro $P = 99\%$, $k_p = 3$ pro $P = 99,73\%$ atd.).

3.2.4 Známé hranice vlivu zdroje

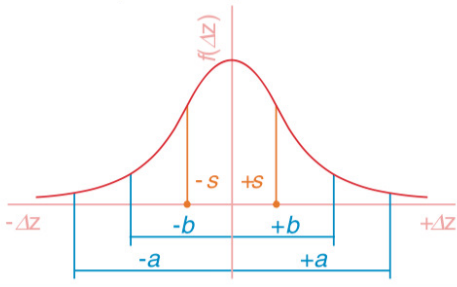
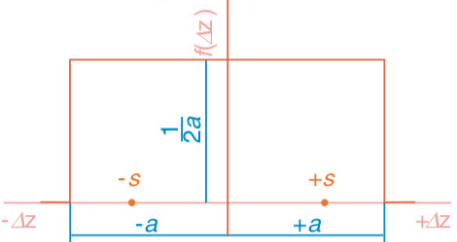
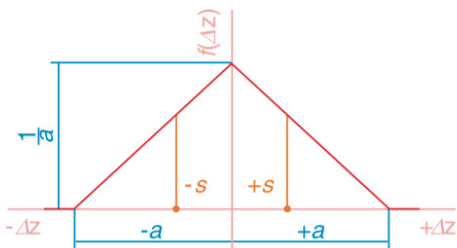
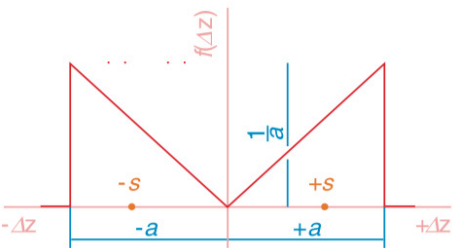
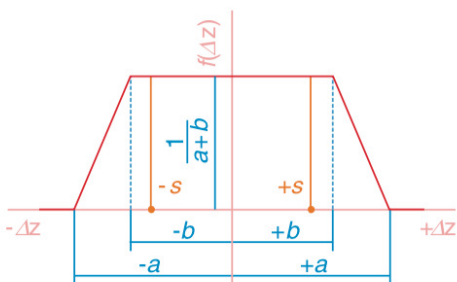
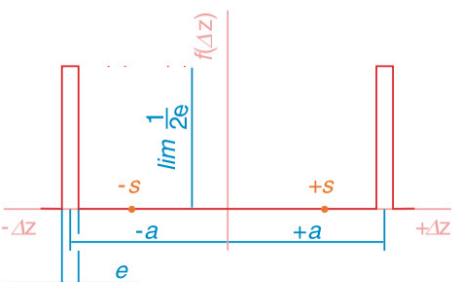
V případě, že není možné odhadnout jen hranice, ve kterých se díky působení daného zdroje vyskytují hodnoty měřené veličiny, a to téměř s jistotou, postupuje se takto:

1. Odhadnutí hodnot změn (odchylek) $\pm z_{jmax}$ od jmenovité hodnoty měřené veličiny příslušející zdroji Z_j , jejich překročení je téměř nemožné.

2. Posouzení rozdělení pravděpodobnosti odchylek v tomto intervalu a určení jeho aproximace.
3. Vypočítání standardní nejistoty $u_B(z_j)$ dle vztahu

$$u_B(z_j) = \frac{z_{jmax}}{k}, \quad (22)$$

kde k je hodnota koeficientu příslušná k vybrané aproximaci rozdělení pravděpodobnosti podle Obr. 2. Tento obrázek vcelku přehledně přibližuje použití pravděpodobnostních modelů používaných pro stanovení nejistot dle příslušného zákona rozdělení.

Rozdělení	z_{max}	k	Rozdělení	z_{max}	k
normální (Gaussovo) 	a	3	rovnoměrné - pravouhlé 	a	$\sqrt{3}$ -1,73
trojúhelníkové (Simpsonovo) 	a	$\sqrt{6}$ -2,45	bimodální (trojúhelníkové) 	a	$\sqrt{2}$ -1,41
lichoběžníkové 	a	2,32 při $b = \frac{a}{3}$	bimodální (Diracovo) 	a	1
	a	-2,19 při $b = \frac{a}{2}$			
	a	-2,04 při $b = \frac{2a}{3}$			

Obrázek 2: Rozdělení pravděpodobnosti a koeficienty k [3]

Aproximace **normálním** rozdělením se použije v případě, kdy se mohou častěji vyskytovat malé odchylky od nominální hodnoty, zatímco s rostoucí velikostí odchylek pravděpodobnost jejich výskytu klesá. O této aproximaci můžeme uvažovat např. tehdy, je-li zdrojem nejistoty měřicí přístroj od spolehlivého výrobce, u něhož lze předpokládat, že většina přístrojů bude zdrojem pouze malých chyb. Proto je také v celé této práci používána právě tato aproximace.

Aproximace **rovnoměrným** rozdělením vychází z předpokladu, že pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky $\pm z_{jmax}$ je v celém daném intervalu stejná.

Trojúhelníkové rozdělení má uplatnění ve velice podobných případech jako u normálního rozdělení.

Bimodální rozdělení aproximuje průběh nejistot např. tehdy, když výrobce rozdělí své měřicí přístroje do určitých tříd přesnosti.

3.2.5 Použití číslicového měřicího přístroje

Používá-li se číslicový měřicí přístroj, je jedním ze zdrojů nejistoty rozlišitelnost poslední platné číslice. Ačkoliv se při opakovaném měření údaj nemění, není v tomto případě nejistota nulová. Při odhadu takové nejistoty se použije modelu rovnoměrného rozdělení pravděpodobnosti v intervalu. Ten je vymezen rozlišovací schopností $\delta(z_j)$ daného přístroje a platí

$$u_B(z_j) = \frac{\delta(z_j)}{2\sqrt{3}} = 0.29\delta(z_j). \quad (23)$$

3.2.6 Použití analogového měřicího přístroje se stupnicí

Při použití analogového měřicího přístroje je schopnost odečítání často dána hodnotou dílku stupnice $\delta(z)$. V tomto případě se standardní nejistota způsobená čtením naměřené hodnoty určí dle vztahu (23). Pro některé analogové přístroje určuje velikost intervalu, sloužící jako předpokládaný zdroj nejistoty ve vztahu k dílku stupnice, norma nebo jiný doporučující předpis.

3.2.7 Přítomnost hystereze

Charakteristika přístroje je nezřídka zatížena nezanedbatelnou hysterezí. Při určování nejistoty způsobené tímto zdrojem se postupuje podobně jako v předchozím případě, opět s použitím vztahu (23).

3.3 Standardní kombinovaná nejistota

Jak již bylo zmíněno dříve, v praxi je obvykle třeba určit celkovou nejistotu, tedy společným číslem vyjádřit nejistotu typu A a nejistotu typu B. K tomu se využívá právě kombinovaná nejistota u_C určena opět ze vztahu

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)}. \quad (24)$$

3.4 Rozšířená nejistota

Skutečná hodnota měřené veličiny zapsaná ve tvaru $y \pm u_c$ definuje výsledek s poměrně malou pravděpodobností, přibližně 60%. Protože je tato pravděpodobnost většinou nedostatečná a je snaha vymezit interval, ve kterém se hodnota nachází s pravděpodobností téměř 100%, zavádí se do praxe tzv. rozšířená nejistota U .

$$U = k_r u_C, \quad (25)$$

kde k_r je koeficient rozšíření a u_C již zmíněná kombinovaná nejistota. Hodnota koeficientu k_r závisí na typu rozdělení pravděpodobnosti výsledku měření.

4 Stanovení standardních nejistot při nepřímém měření

4.1 Postupy určování

Hledaná (výstupní) veličina Y je známou funkcí veličin X_1, X_2, \dots, X_m (vstupní veličiny). Jako takové veličiny se označují ty, které lze přímo změřit nebo jsou z jiných zdrojů známy jejich odhady, nejistoty a kovariance. Tedy

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m). \quad (26)$$

Odhad y výstupní veličiny Y se poté určí jako

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (27)$$

kde x_1, x_2, \dots, x_m jsou odhady vstupních veličin X_1, X_2, \dots, X_m . Nejistota odhadu y veličiny Y pro nekorelované odhady x_1, x_2, \dots, x_m se určí z již známého vztahu

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i), \quad (28)$$

pro převodové koeficienty (koeficienty citlivosti) A_i platí

$$A_i = \left. \frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_i} \right|_{X_1=x_1, \dots, X_m=x_m}. \quad (29)$$

Pro případ korelovaných odhadů x_1, x_2, \dots, x_m musí být brány v úvahu také kovariance mezi jednotlivými odhady, ty se pak ve složkách podílejí na velikosti výsledné nejistoty. Stanovení nejistoty výstupní veličiny s korelovanými vstupními veličinami je dáno vztahem

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(x_i, x_j), \quad (30)$$

kde $u(x_i, x_j)$ je kovariance mezi navzájem korelovanými odhady x_i a x_j , ty mohou představovat buď dvě vzájemně závislé různé veličiny, nebo dvě hodnoty té samé veličiny, mezi kterými existuje jistá korelační vazba. V některých situacích může být výhodné určení nejistot odhadu y veličiny Y zvláště metodou typu A a zvláště metodou typu B. V tomto případě je celková (kombinovaná) nejistota

$$u_C(y) = \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)}. \quad (31)$$

4.2 Kovariance při určování výsledných nejistot

4.2.1 Kovariance a nejistoty

Již dříve byly naznačeny některé nejčastější zdroje nejistot, existence vazeb mezi jednotlivými zdroji způsobuje kovariance při působení jednotlivých zdrojů nejistot. To, jak jsou odhady vlivů jednotlivých zdrojů vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot, určují právě kovariance. Navzájem závislé zdroje nejistot více nebo méně ovlivňují výslednou nejistotu, záleží na tom, jak se příslušné nejistoty slučují. Společné zdroje jsou

uvažovány proto, aby byl jejich vliv zohledněn ve výsledné nejistotě. Kovariance mohou výslednou nejistotu zvětšit i zmenšit, to záleží na jejich charakteru (tzn. zda zdroje působí souladně, či protichůdně na dva vybrané odhady) a také na podobě funkce, která je spojuje s výstupní veličinou. Kovariance mezi jednotlivými vstupními veličinami X_i a X_j mohou být určeny opět buď metodou typu A, nebo metodou typu B, což bude přiblíženo dále.

4.2.2 Stanovení kovariance metodou typu A

Tato metoda se pro stanovení kovariancí mezi dvěma odhady x_i a x_j dvou vstupních veličin použije tehdy, pokud je známo n naměřených hodnot obou veličin $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ a $x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn}$. Jsou-li odhady x_i a x_j představovány aritmetickými průměry

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ik}, \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{jk}, \quad (32)$$

vypočítá se kovariance určená metodou typu A ze vztahu

$$u_A(x_i, x_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j). \quad (33)$$

4.2.3 Stanovení kovariance metodou typu B

Stejně jako nejistota vyhodnocená metodou typu B je i kovariance $u_B(x_i, x_j)$ vyhodnocená metodou typu B zjišťována jinak, než za použití metod vycházejících ze statistické analýzy naměřených údajů. Kovarianci lze určit čtením z certifikátů přístrojů, literatury apod., nebo výpočtem. Výpočet obsahuje těchto pět rámcových kroků:

1. Vytipování zdrojů závislostí (zdroje korelací).
2. Odhadnutí korelačního koeficientu $r(x_i, x_j)$ pro každý zdroj každé dvojice odhadů na základě zkušeností. Tento koeficient vyjadřuje míru závislosti mezi odhady a nabývá hodnot od -1 do +1. Hodnoty blízké ± 1 znamenají silnou závislost, hodnoty blízké 0 naopak slabou závislost. Odpovídající velikost kovariance se určí dle vztahu

$$u_B(x_i, x_j) = r(x_i, x_j)u_B(x_i)u_B(x_j). \quad (34)$$

3. V případě dvou vstupních veličin X_1, X_2 s odhady x_1, x_2 , které jsou funkcemi nezávislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , lze vyjádřit vztahy

$$X_1 = g_1(Z_1, Z_2, \dots, Z_m), X_2 = g_2(Z_1, Z_2, \dots, Z_m), \quad (35)$$

určí se kovariance mezi odhady x_1, x_2

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m A_{1i}A_{2i}u_B^2(z_i), \quad (36)$$

kde A_{1i} a A_{2i} jsou koeficienty citlivosti pro funkce g_1 a g_2 podle vztahu (29). Vztah (36) umožňuje určit kovarianci mezi odhady, jsou-li známy funkční závislosti vstupních veličin X_1, X_2 na nezávislých veličinách (Z_1, Z_2, \dots, Z_m) . Díky tomu se někdy dá

vhodným sestavením modelu měření vyhnout jinak nevyhnutelnému odhadování hodnoty korelačního koeficientu. Pokud se veličiny X_1, X_2 , které vystupují v modelu (26), nahradí vztahy (35), vzájemně závislé veličiny X_1, X_2 už dále nebudou v modelu (26) vystupovat.

4. V případě dvou vstupních veličin X_1, X_2 s odhady x_1, x_2 , které jsou funkcemi závislých veličin Z_1, Z_2, \dots, Z_m , což lze vyjádřit vztahy (35), určí se kovariance mezi odhady x_1, x_2 takto

$$u_B(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j) = \sum_{i=1}^m A_{1i} A_{2i} u_B^2(z_i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1, j \neq i}^m A_{1i} A_{2j} u_B(z_i, z_j), \quad (37)$$

kde $u_B(z_i, z_j)$ je známá kovariance mezi odhady z_i a z_j .

5. Pokud není možné stanovit korelační koeficient ani se korelacím vyhnout pomocí sestavení vhodného modelu, určí se maximální vliv korelace na výslednou nejistotu prostřednictvím horní hranice odhadu standardní nejistoty měřené veličiny. Předpokládají se korelované veličiny X_1, X_2 v modelu (26) a neznámý stupeň korelace. Protože ostatní veličiny v modelu korelované nejsou, poté platí

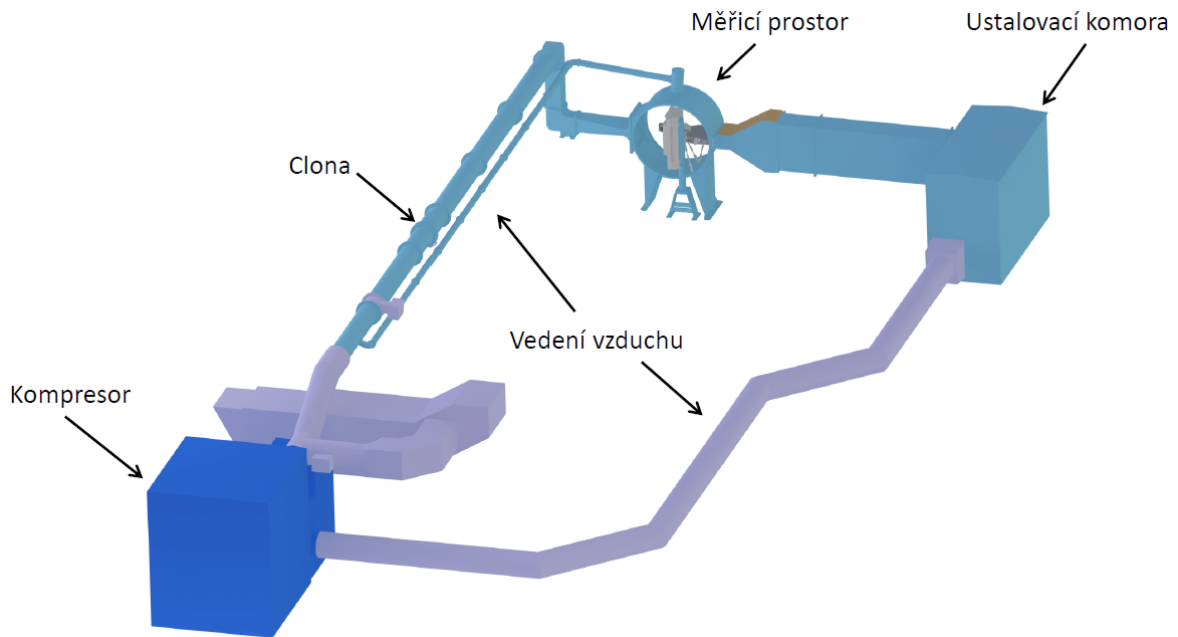
$$u_B^2(y) \leq [|A_1 u_B(x_1)| + |A_2 u_B(x_2)|]^2 + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = A_1^2 u_B^2(x_1) + A_2^2 u_B^2(x_2) + \quad (38)$$

$$+ 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2) + \sum_{i=3}^m A_i^2 u_B^2(x_i) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_B^2(x_i) + 2|A_1 A_2| u_B(x_1) u_B(x_2).$$

Z tohoto vyplývá, že při nedostatku informací pro přesné ohodnocení kovariancí, a tím i výsledné nejistoty, lze uvádět horní hranici nejistoty.

5 Experimentální zařízení

Experimentální zařízení, na němž jsou prováděny odhady nejistot měření základních měřených veličin, je používáno pro měření nestacionárních vazebných aerodynamických sil a momentů v lopatkové mříži. Experimentální zařízení je vlastně aerodynamickou tratí, která je složena z několika částí: měřicí prostor, převáděcí potrubí, clona, turbokompresor a dvě ustalovací komory. K proudění vzduchu dochází podtlakem nasáváním vzduchu kompresorem. Rychlost proudění vzduchu je možné regulovat změnou otáček turbokompresoru a také pomocí klapky, těmi se reguluje sání, přísávání a výtlač turbokompresoru. Pro lepší představu o celé měřicí trati viz Obr. 3. Měřené veličiny jsou zaznamenávány a vyhodnocovány softwarem, speciálně vytvořeným pro tento experiment. Hodnoty veličin zobrazených na displeji, jsou vypočítány jako aritmetický průměr z několika změřených hodnot za určitý čas. Software bohužel nezaznamenává okamžité hodnoty, ze kterých je tvořen aritmetický průměr. Tento fakt s sebou však nese omezení v podobě odhadu standardní nejistoty typu A, jejíž zpracování je založeno na statistické analýze okamžitých hodnot. Proto jsou v této práci odhadovány pouze standardní nejistoty typu B. Ukázka měření zpracovaného tímto softwarem je uvedena na Obr. 13, viz příloha.



Obrázek 3: Schéma experimentálního zařízení

6 Měření tlaku na cloně

Tlak je na experimentálním zařízení měřen ve dvou místech. První měření je realizováno přímo uvnitř měřicího prostoru pomocí Prandltovy sondy, druhé měření probíhá na cloně za použití diferenčních tlakových snímačů.

6.1 Diference tlaku před a za clonou

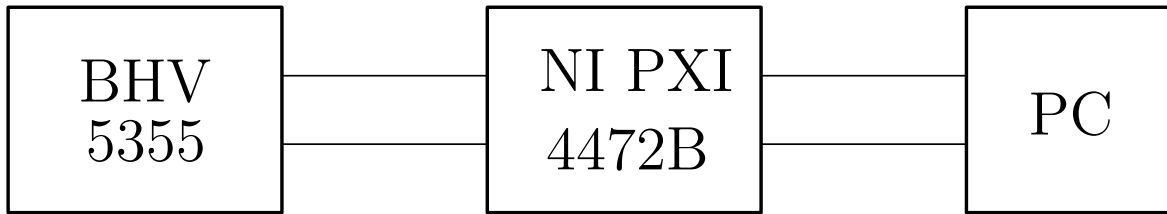
Rozdíl tlaků před a za clonou je na aerodynamickém tunelu měřen diferenčním tlakovým snímačem (dále jen DTS) BHV 5355, což je převodník tlakové difference na výstupní elektrický signál. Výstupní signál je většinou unifikovaný a to buď proudový, nebo napěťový, zde je výstupní signál unifikovaný a napěťový. Tento snímač je určen ke snímání přetlaku, podtlaku a tlakové difference plynů a kapalin. Výhodami tohoto DTS jsou široký měřicí rozsah, dlouhodobá stabilita a možnost volby výstupního signálu. Technický list DTS BHV 5355, viz příloha. V tab. 1 jsou uvedeny změřené hodnoty a základní technické údaje DTS BHV 5355.

Změřená hodnota difference tlaku před a za clonou	$p_{dif} = 19,0359 \text{ kPa}$
Teplota proudícího média na cloně	$t = 13,9 \text{ °C}$
FS("full scale") - měřicí rozsah	0...50 kPa
Vstupní signál	0...10 V

Tabulka 1: Hodnoty měření a technické údaje BHV 5355

Pro odhad standardní nejistoty typu B bylo nejprve nutné sestavit měřicí řetěz a stanovit všechny zdroje nejistot měření, které vstupují do měřicího řetězce. Z Obr. 4 je

patrné, že zdroje nejistot se budou vyskytovat u DTS BHV 5355 a měřicí karty NI PXI 4472B (tj. zařízení pro přímé zpracování a vyhodnocování signálu počítačem). Protože se jedná o první konkrétní odhad standardní nejistoty typu B v této práci, bude zde pro lepší představu o problematice odhadu nejistot předveden celý postup řešení.

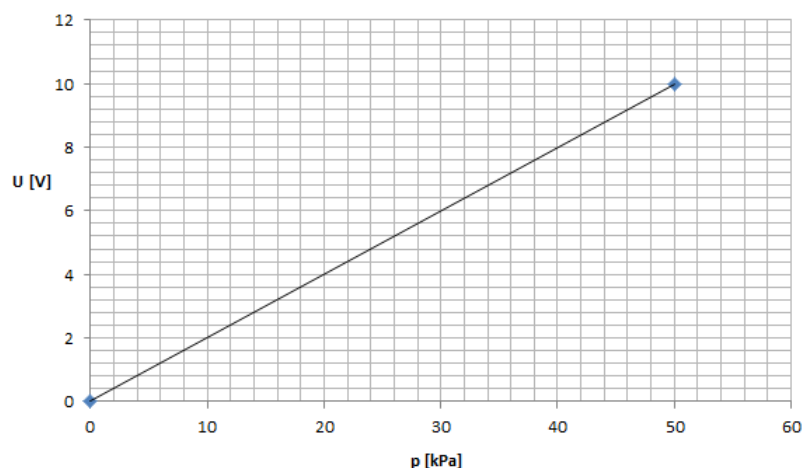


Obrázek 4: Schéma měřicího řetězce pro měření difference tlaku na cloně

6.1.1 Standardní nejistota typu B pro DTS BHV 5355

Prvním krokem bylo převedení měřeného tlaku na napětí. Zcela správný postup stanovení závislosti mezi tlakem a napětím je následující. Při kalibraci tlakových převodníků je odečteno alespoň pět hodnot tlaků, pro které jsou odečteny odpovídající hodnoty napětí. Souřadnice na ose x odpovídá hodnotě tlaku zatímco souřadnice na ose y hodnotě napětí. Mezi těmito body je sestrojena vhodná regresní křivka. Když je známa regresní funkce (obvykle parametrická) je možné počítat (analyticky, jelikož máme funkci $p(u)$) hodnoty tlaků z vysílaného napětí. Jelikož údaje z kalibrace tlakových převodníků nebyly známy, bylo využito lineární závislosti tlaku na napětí dle Obr. 5, pro kterou byly v technické specifikaci převodníku uvedeny hodnoty napětí pro nulový a maximální tlak, který odpovídá hodnotě 50 kPa. Pro tuto závislost pak platí rovnice přímky ve tvaru

$$U = 0,2 \cdot p. \quad (39)$$



Obrázek 5: Graf závislosti tlaku na napětí pro BHV 5355

Hodnotě tlaku $p_{dif} = 19,0359$ kPa odpovídá napětí $U = 3,8072$ V.

V technické specifikaci byly jako jednotlivé zdroje přístrojové nejistoty uvedeny tyto zdroje: nelinearita, hystereze, opakovatelnost, vliv teploty na citlivost a vliv teploty na posunutí nuly. Pro všechny zmíněné zdroje byla vyjádřena nejistota dle technického listu v kPa a poté byla vztahem (39), z důvodu dalších výpočtů, převedena na napětí. Pro větší přehlednost jsou nejistoty od jednotlivých zdrojů uvedeny v tab. 2.

Zdroj přístrojové nejistoty	Standardní nejistota dílčího zdroje		
Nelinearita	$\leq 0,5\%FS$	$\Rightarrow u_n = 0,25 \text{ kPa}$	$\Rightarrow u_n = 0,05 \text{ V}$
Hystereze	$\leq 0,15\%FS$	$\Rightarrow u_h = 0,075 \text{ kPa}$	$\Rightarrow u_h = 0,015 \text{ V}$
Opakovatelnost	$\leq 0,1\%FS$	$\Rightarrow u_o = 0,05 \text{ kPa}$	$\Rightarrow u_o = 0,01 \text{ V}$
Vliv teploty na citlivost	$\leq 0,417\%FS$	$\Rightarrow u_c = 0,2085 \text{ kPa}$	$\Rightarrow u_c = 0,0417 \text{ V}$
Vliv teploty na posunutí od nuly	$\leq 0,417\%FS$	$\Rightarrow u_p = 0,2085 \text{ kPa}$	$\Rightarrow u_p = 0,0417 \text{ V}$

Tabulka 2: Přístrojové zdroje nejistot BHV 5355 a jejich hodnoty

Odhad standardní nejistoty typu B dílčího zdroje, kterým je DTS BHV 5355, δu_{BHV} je stanovena následujícím vztahem.

$$\delta u_{BHV} = \sqrt{u_n^2 + u_h^2 + u_o^2 + u_c^2 + u_p^2} \quad (40)$$

$$\delta u_{BHV} = \sqrt{0,05^2 + 0,015^2 + 0,01^2 + 0,0417^2 + 0,0417^2} = \pm 0,0794 \text{ V} \quad (41)$$

6.1.2 Standardní nejistota typu B pro NI PXI 4472B

Tato měřicí karta pracuje se vstupním napěťovým signálem, proto musely být v předchozí kapitole nejistoty vyjádřené pomocí tlaku převedeny na nejistoty vyjádřené ve formě napětí. Přímou výrobcem této měřicí karty, firmou National Instruments, je udáván vztah pro výpočet přístrojové nejistoty v podobě součtu dílčích nejistot, viz následující vztah.

$$\text{Absolute Accuracy} = \text{Gain Error} + \text{Offset Error} + \text{Flatness}. \quad (42)$$

Na levé straně rovnice je standardní nejistota typu B dílčího zdroje, na pravé straně jsou uvedeny jednotlivé přístrojové nejistoty. Zdroje jednotlivých přístrojových nejistot převzaté z technického listu jsou opět pro lepší přehlednost uvedeny v tab. 3.

Zdroj přístrojové nejistoty	Standardní nejistota dílčího zdroje
Offset	$\pm 3 \text{ mV}$
Gain	$\pm 0,1 \text{ dB}$
Flatness	$\pm 0,1 \text{ dB}$

Tabulka 3: Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B

Menší komplikací je výrobcem udávaná hodnota nejistot gain a flatness v decibelech, nicméně je možné tuto hodnotu přepočítat na relativní nejistotu v procentech a posléze na napětí. Protože je vzorec totožný jak pro přepočet nejistoty gain, tak i flatness a i hodnota těchto nejistot je stejná, bude zde uveden pouze výpočet nejistoty gain.

$$\text{gain[dB]} = 20 \cdot \log\left(1 + \frac{\text{gain}[\%]}{100}\right) \quad (43)$$

$$\Rightarrow \text{gain}[\%] = \left(10^{\frac{\text{gain[dB]}}{20}} - 1\right) \cdot 100 \quad (44)$$

$$\text{gain}[\%] = \left(10^{\frac{0,1}{20}} - 1\right) \cdot 100 = 1,158\% \quad (45)$$

Vztah pro absolutní hodnotu dílčí nejistoty je uveden na následujícím řádku.

$$\text{gain[V]} = \text{vstupní napětí[V]} \cdot \text{gain}[\%] \quad (46)$$

Jako vstupní napětí U je uvažováno to napětí, které odpovídá měřenému tlaku $p_{dif} = 19,0359$ kPa, tedy $U = 3,80718$ V. Dle vztahu (46) jsou dopočteny absolutní hodnoty příspěvků nejistoty měření a zaneseny do tab. 4.

Zdroj přístrojové nejistoty	Standardní nejistota dílčího zdroje
Offset	$\Rightarrow u_s = 0,003$ V
Gain	$\Rightarrow u_g = 0,0441$ V
Flatness	$\Rightarrow u_f = 0,0441$ V

Tabulka 4: Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B a jejich hodnoty při měření difference tlaku

Standardní nejistota typu B dílčího zdroje NI PXI 4472B δu_{NI} je vypočtena ze vztahu (42) takto

$$\delta u_{NI} = u_s + u_g + u_f = 0,003 + 0,0441 + 0,0441 = \pm 0,0912 \text{ V}. \quad (47)$$

6.1.3 Výsledná standardní nejistota typu B

V posledním kroku je odhad standardní nejistoty typu B vyjádřen podle následujícího vztahu, kde $\delta u_{p_{dif}}$ je výsledná standardní nejistota typu B vztažena na napětí.

$$\delta u_{p_{dif}} = \sqrt{\delta u_{BHV}^2 + \delta u_{NI}^2} = \sqrt{0,0794^2 + 0,0912^2} = \pm 0,1209 \text{ V} \quad (48)$$

Pro lepší představu o velikosti nejistoty je ještě tato hodnota dle závislosti (39) převedena zpět na tlak, tedy

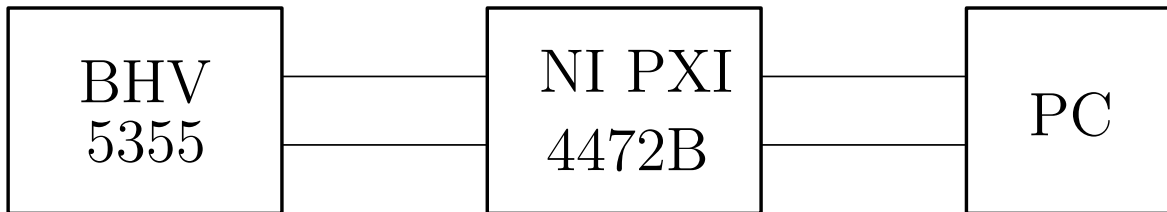
$$\delta p_{dif} = \frac{\delta u_{p_{dif}}}{0,2} = \frac{0,1209}{0,2} = \pm 0,6045 \text{ kPa}. \quad (49)$$

To odpovídá přibližně 3,2% z měřené hodnoty. Uvedený odhad nejistoty měření je také vyhodnocen v příslušné bilanční tabulce, viz příloha. Zápis difference tlaku s ohledem na nejistotu měření je řízen pokynem pro vyjádření nejistoty měření dle ČSN P ENV 13005.

$$p_{dif} = 19,04 \pm 0,61 \text{ kPa} \quad (50)$$

6.2 Diference tlaku před clonou a barometrickým tlakem

Jak je patrné z Obr. (6), toto měření je realizováno shodně jako měření difference tlaku před a za clonou. Jediné, v čem se tato dvě měření liší, je hodnota tlakové difference. Dle vztahu (39) odpovídá měřený tlak $p_{stat} = 11,3893$ kPa napětí $U = 2,2779$ V.



Obrázek 6: Schéma měřicího řetězce pro diferenci tlaku před clonou a barometrickým tlakem

Standardní nejistoty typu B dílčích zdrojů, tedy DTS BHV 5355 a měřicí karty NI PXI 4472B, zůstávají stejné. Stejně zůstávají i jednotlivé přístrojové nejistoty, ty již byly uvedeny v tabulkách (2) a (4).

Výsledná standardní nejistota typu B pro diferenci tlaku před clonou a barometrickým tlakem δp_{stat} je stejná jako v případě difference tlaku před a za clonou,

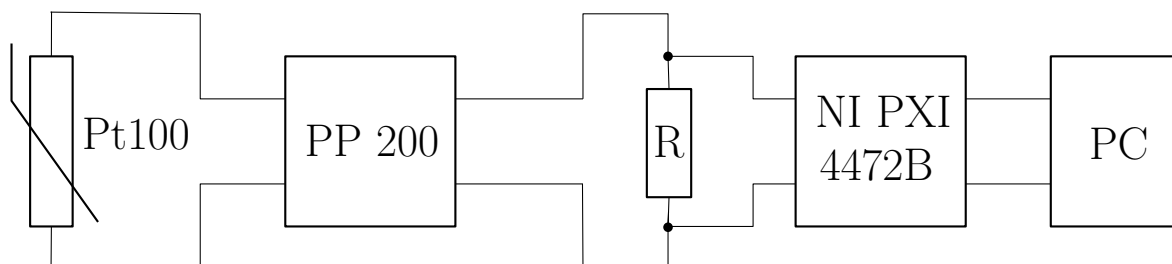
$$\delta p_{dif} = \delta p_{stat} = \pm 0,6045 \text{ kPa.}$$

Tato hodnota představuje přibližně 5,3% z měřeného tlaku. Odhad nejistoty je zpracován v bilanční tabulce, viz příloha. Výsledek měření byl opět zapsán v souladu s ČSN P ENV 13005.

$$p_{stat} = 11,39 \pm 0,61 \text{ kPa} \quad (51)$$

7 Měření teploty proudícího média za clonou

Pro měření teploty proudícího média za clonou je na experimentálním zařízení zabudován prostorový odporový teploměr PTP10 od společnosti Rawet. Teploměr je vybaven programovatelným převodníkem teploty PP200 téže společnosti, technická specifikace viz příloha. Převodník je naprogramován pro odporové čidlo teploty Pt100, které odpovídá normě IEC-ČSN 751. Na Obr. 7 je znázorněn měřicí řetězec tohoto měření. Dle



Obrázek 7: Schéma měřicího řetězce pro měření teploty na cloně

technické specifikace převodníku PP200 je jeho výstupní signál proudový. Rezistor,

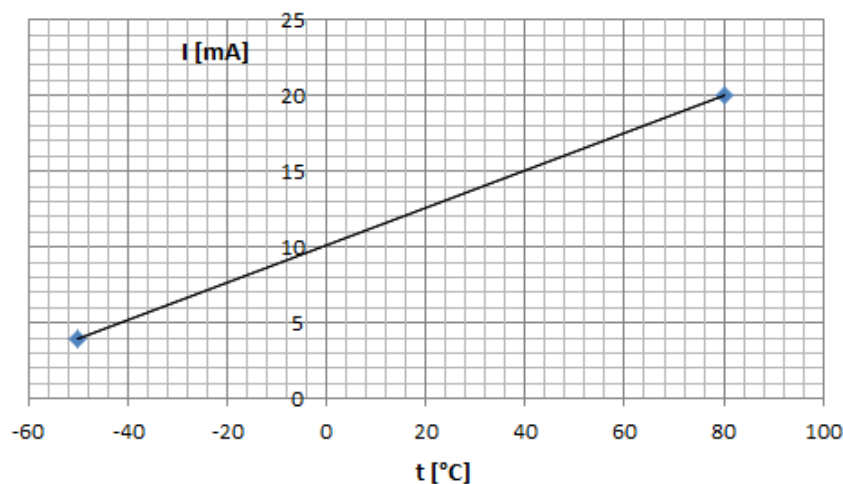
předřazený měřicí kartě NI PXI 4472B, pouze převádí tento proudový signál na napěťový, protože měřicí karta pracuje na vstupu s napětím. Takto zpracovaný signál je odeslán do počítače. V tab. 5 jsou zaneseny údaje o měření a nastavení převodníku.

Změřená teplota proudícího média za clonou	$t = 13,9 \text{ } ^\circ\text{C}$
FS("full scale") - měřicí rozsah	$-50 \dots + 80 \text{ } ^\circ\text{C}$
Výstupní signál	$4 \dots 20 \text{ mA}$

Tabulka 5: Parametry PP200

Z hlediska dalšího postupu v odhadování nejistoty bylo nutné stanovit závislost mezi teplotou a elektrickým proudem. Zde by bylo opět správné vycházet z kalibračních údajů, jak bylo naznačeno již dříve v kapitole 6.1.1. Tyto údaje však nebyly známy, proto byla uvažována lineární závislost elektrického proudu na teplotě dle Obr. 8. V technické specifikaci převodníku PP200 je pro spodní hranici teploty uvedena hodnota elektrického proudu 4 mA a pro horní hranici 20 mA, jedná se o unifikovaný proudový signál. Rovnice regresní přímky je vyjádřena následujícím vztahem

$$I = 0,123077 \cdot t + 10,153846. \tag{52}$$



Obrázek 8: Graf závislosti elektrického proudu na teplotě pro PP200

Na následujících řádcích budou vyhodnoceny standardní nejistoty typu B dílčích zdrojů.

7.1 Standardní nejistota typu B pro Pt100

Prvním zdrojem nejistoty měření je odporové teplotní čidlo Pt100. Principem těchto čidel je teplotní závislost odporu kovu, kdy se s rostoucí teplotou úměrně zvyšuje elektrický odpor. Čidla jsou vyráběna v několika tolerančních třídách. Odporové teplotní

čidlo z převodníku PP200 je třídy přesnosti A. Pro třídu přesnosti A je v normě IEC-ČSN 751 uveden odhad nejistoty ve tvaru

$$\Delta t = \pm(0,150 + 0,002 \cdot |t|) \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (53)$$

kde Δt představuje přístrojovou nejistotu měření teploty a t měřenou teplotu. Dle předchozího vztahu byla odhadnuta dílčí přístrojová nejistota u_{Pt} .

$$u_{Pt} = \pm(0,150 + 0,002 \cdot 13,9) = \pm 0,178 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (54)$$

Tato hodnota byla z důvodu dalších výpočtů převedena na elektrický proud podle vztahu (52), tedy $u_{Pt} = \pm 0,0219 \text{ A}$.

7.2 Standardní nejistota typu B pro PP200

Další zdroje nejistot, které jsou vnášeny do měřicího řetězce, jsou přístrojové nejistoty převodníku PP200. Všechny tyto nejistoty jsou zaznamenány v tab. 6, kde jsou již také dopočteny jim příslušné velikosti. Převod teploty na elektrický proud je dán vztahem (52). Hodnoty pro chybu omezenou rozlišitelností jsou odhadovány jako

$$u_R = \frac{s}{2 \cdot 2^n \cdot k}, \quad (55)$$

kde u_R je chyba rozlišitelností, s je měřicí rozsah dané veličiny, n rozlišitelnost převodníku a k je hodnota koeficientu příslušná k vybrané aproximaci rozdělení pravděpodobnosti podle Obr. 2. Poté

$$u_i = \frac{130}{2 \cdot 2^{14} \cdot \sqrt{3}} = 0,0023 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (56)$$

$$u_o = \frac{16}{2 \cdot 2^{12} \cdot \sqrt{3}} = 0,0013 \text{ mA}. \quad (57)$$

Zdroj přístrojové nejistoty	Standardní nejistota dílčího zdroje		
Chyba nastavení	$\leq 0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_n = 0,1500 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_n = 0,0185 \text{ mA}$
Teplotní chyba	$\leq 0,65 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_t = 0,6500 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_t = 0,0800 \text{ mA}$
Chyba linearity	$\leq 0,05\%FS$	$\Rightarrow u_l = 0,0650 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_l = 0,0080 \text{ mA}$
Chyba rozlišitelnosti - vstup	14 bit	$\Rightarrow u_i = 0,0023 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_i = 0,0003 \text{ mA}$
Chyba rozlišitelnosti - výstup	12 bit	$\Rightarrow u_o = 0,0104 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\Rightarrow u_o = 0,0013 \text{ mA}$

Tabulka 6: Přístrojové zdroje nejistot PP200 a jejich hodnoty

Velikost odhadu standardní nejistoty typu B dílčího zdroje, kterým je inteligentní programovatelný převodník teploty PP200, δu_{PP} je stanovena následovně.

$$\delta u_{PP} = \sqrt{u_{Pt}^2 + u_n^2 + u_t^2 + u_l^2 + u_i^2 + u_o^2} = \pm 0,0854 \text{ mA} \quad (58)$$

Pro převod nejistoty tohoto dílčího zdroje zpět na teplotu je využito směrnice přímkou z rovnice (52), poté

$$\delta u_{PP} = \frac{0,0854}{0,123077} = \pm 0,694 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (59)$$

7.3 Standardní nejistota typu B pro rezistor

Nominální hodnota odporu pasivního rezistoru je 500Ω a je řazen do toleranční třídy D. Přesnost této třídy je $\pm 0,5\%$ z nominální hodnoty odporu rezistoru. Pro rezistor je tedy nejistota velikosti odporu

$$\Delta R = \pm 2,5\Omega. \quad (60)$$

Protože rezistor je v měřicím řetězci z důvodu převodu signálu v podobě elektrického proudu na signál v podobě napětí, je jeho nejistota přenesena i do napětí, které je vstupním signálem pro měřicí kartu NI PXI 4472B. Odhad nejistoty vstupního napětí δu_R , který je zároveň výslednou dílčí nejistotou, je zřejmý ze vztahu

$$\delta u_R = \sqrt{(A_R \cdot \Delta R)^2 + (A_I \cdot \Delta I)^2}, \quad (61)$$

kde A_R je citlivostní koeficient odporu, A_I je citlivostní koeficient proudu, ΔR je nejistota velikosti odporu a $\Delta I = \delta u_{PP}$ vyjádřena v mA. Citlivostní koeficienty jsou určeny z Ohmova zákona $U = R \cdot I$ jako jeho derivace dle příslušné veličiny, viz níže.

$$A_R = \frac{\partial U}{\partial R} = I = 11,865 \text{ mA} \quad (62)$$

$$A_I = \frac{\partial U}{\partial I} = R = 500\Omega \quad (63)$$

Elektrický proud $I = 11,8646 \text{ mA}$ pro teplotu $t = 13,9^\circ\text{C}$ byl stanoven z lineární závislosti teploty na elektrickém proudu vztahem (52). Výsledný odhad standardní nejistoty typu B dílčího zdroje, kterým je rezistor, má tvar

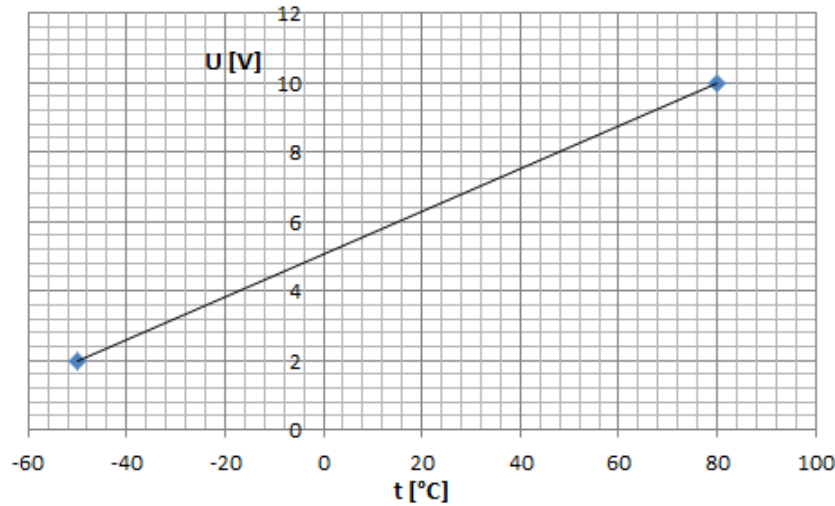
$$\delta u_R = \sqrt{(11,8646 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5)^2 + (500 \cdot 0,0854 \cdot 10^{-3})^2} = \pm 0,0520 \text{ V}. \quad (64)$$

Pro vyjádření celkového odhadu standardní nejistoty typu B pro měření teploty za clonou, musí být všechny dílčí odhady nejistot uvedeny ve formě teploty. Z toho důvodu bylo nutné určit závislost napětí na teplotě, bylo využito údajů z technické specifikace měřicí karty NI PXI 4472B. Závislost je lineární, kdy je, pro nominální hodnotu odporu 500Ω a elektrický proud 4 mA , velikost napětí na spodní hranici teploty 2 V a na horní hranici 10 V pro nominální hodnotu odporu 500Ω a elektrický proud 20 mA . Popsaná závislost je znázorněna na Obr. 9 a je definována regresní přímkou ve tvaru

$$U = 0,061538 \cdot t + 5,076923. \quad (65)$$

Převod odhadu nejistoty dílčího zdroje na teplotu je proveden využitím směrnice regresní přímky z předchozího vztahu.

$$\delta u_R = \frac{0,0520}{0,061538} = \pm 0,845 \text{ }^\circ\text{C} \quad (66)$$



Obrázek 9: Graf závislosti napětí na teplotě pro NI PXI 4472B

7.4 Standardní nejistota typu B pro NI PXI 4472B

Postup při vyšetřování odhadu této nejistoty je stejný jako v kapitole 6.1.2, liší se jen číselně a to konkrétně ve velikosti vstupního napětí ve vztahu (46). Jednotlivé přístrojové nejistoty jsou uvedeny v tab. 7.

Zdroj přístrojové nejistoty	Standardní nejistota dílčího zdroje
Offset	$\Rightarrow u_s = 0,003 \text{ V}$
Gain	$\Rightarrow u_g = 0,0687 \text{ V}$
Flatness	$\Rightarrow u_f = 0,0687 \text{ V}$

Tabulka 7: Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B a jejich hodnoty při měření teploty

Standardní nejistota typu B dílčího zdroje NI PXI 4472B δu_{NI} je vypočtena ze vztahu (42) takto

$$\delta u_{NI} = u_s + u_g + u_f = 0,003 + 0,0687 + 0,0687 = \pm 0,1404 \text{ V}. \quad (67)$$

Pro přepočítání nejistoty na teplotu je opět použita směrnice přímky z rovnice (65), tedy

$$\delta u_{NI} = \frac{0,1404}{0,061538} = \pm 2,282 \text{ °C}. \quad (68)$$

7.5 Výsledná standardní nejistota typu B

Posledním krokem je odhadnutí standardní nejistoty typu B pro celý měřicí řetěz teploty, způsobem uvedeným na následujícím řádku.

$$\delta t = \sqrt{\delta u_{PP}^2 + \delta u_R^2 + \delta u_{NI}^2} = \sqrt{0,694^2 + 0,845^2 + 2,282^2} = \pm 2,531 \text{ °C} \quad (69)$$

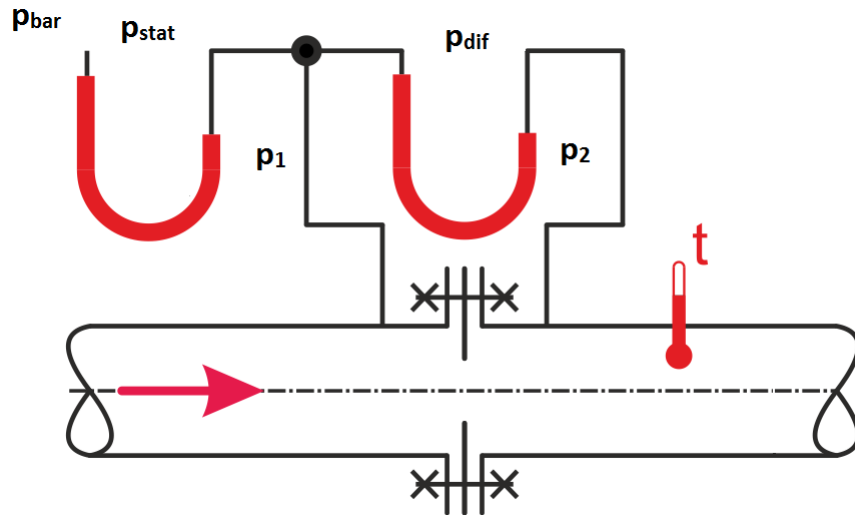
Tato hodnota představuje přibližně 18,2% z měřené teploty. Po stanovení výsledné nejistoty je měřená teplota zapsána v souladu s ČSN P ENV 13005 jako

$$t = 13,9 \pm 2,5 \text{ °C}. \quad (70)$$

Příslušná bilanční tabulka viz příloha.

8 Měření hmotnostního průtoku centrickou clonou

Celý postup měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu je podrobně vysvětlen v normách ČSN EN ISO 5167-1 a ČSN EN ISO 5167-2. V této práci budou proto uvedeny jen vztahy nezbytné pro výpočet hmotnostního průtoku clonou na již dříve popsáném experimentálním zařízení. Schéma clony je vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 10: Schéma měření hmotnostního průtoku clonou

Základní vztah pro výpočet hmotnostního průtoku clonou q_m má tvar

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}, \quad (71)$$

kde C je součinitel průtoku, β je poměr průměru clony d ku průměru potrubí D , ε je součinitel expanze, Δp je rozdíl tlaku proudícího média před a za clonou a ρ je hustota proudícího média před clonou, tím je v tomto aerodynamickém tunelu vzduch. Následuje stanovení jednotlivých členů potřebných pro stanovení hmotnostního průtoku dle předchozího vzorce.

Součinitel průtoku C :

$$\begin{aligned} C = & 0,5961 + 0,0261 \cdot \beta^2 - 0,216 \cdot \beta^8 + 0,000521 \cdot \left(\frac{10^6 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 \\ & + 0,0063 \cdot A) \cdot \beta^{3,5} \cdot \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} + (0,043 + 0,080 \cdot e^{-10 \cdot L_1} - 0,123 \\ & \cdot e^{-7 \cdot L_1}) \cdot (1 - 0,11 \cdot A) \cdot \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031 \cdot (M_2' - 0,8 \cdot M_2'^{1,1}) \cdot \beta^{1,3} \end{aligned} \quad (72)$$

Reynoldsovo číslo potrubí Re_D je bezrozměrný parametr vyjadřující poměr mezi setrvačnými a třecími silami v potrubí před clonou.

$$Re_D = \frac{4 \cdot q_m}{\pi \cdot \mu \cdot D} \quad (73)$$

Dynamická viskozita tekutiny μ je stanovena jako

$$\mu = \nu \cdot \rho, \quad (74)$$

kde ν je kinematická viskozita tekutiny dopočtena ze Sutherlandova vzorce ve tvaru

$$\nu = \frac{2,48982 \cdot 10^{-5}}{\rho \cdot (T + 122)} \cdot \sqrt{\frac{T^3}{273,15}}, \quad (75)$$

teplota T je zadávána v absolutní stupnici.

Koeficient A je uváděn ve tvaru

$$A = \left(\frac{19000 \cdot \beta}{Re_D} \right)^{0,8}. \quad (76)$$

Koeficient M'_2 je určen vzorcem

$$M'_2 = \frac{2 \cdot L'_2}{1 - \beta}, \quad (77)$$

kde L'_2 je podíl vzdálenosti zadního odběru tlaku od zadní strany clonového kotouče a průměru potrubí. Pro přírubové odběry, které jsou na této cloně, platí následující

$$L'_2 = L_1 = \frac{25,4}{D}, \quad (78)$$

L_1 je podíl vzdálenosti předního odběru tlaku od přední strany clonového kotouče a průměru potrubí a průměr potrubí je dosazován v milimetrech.

Součinitel expanze ε :

$$\varepsilon = 1 - (0,351 + 0,256 \cdot \beta^4 + 0,93 \cdot \beta^8) \cdot \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \right] \quad (79)$$

Předchozí rovnice je použitelná jen v případě, kdy poměr tlaku za clonou p_2 a tlaku před clonou p_1 je větší nebo roven hodnotě 0,75. Tlaky jsou uváděny jako absolutní, jejich stanovení je možné ze znalosti barometrického tlaku, statického tlaku před clonou a difference tlaků před a za clonou. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tab. 8.

Diference tlaku Δp ze vztahu (71) je rovna hodnotě p_{dif} z kapitoly 6.1.

Hustota proudícího vzduchu před clonou je dopočtena ze stavové rovnice, která má poté tvar

$$\rho = \frac{p_1}{r \cdot T}. \quad (80)$$

Z několika předešlých vztahů je patrna závislost mezi dvěma neznámými veličinami a to mezi hmotnostním průtokem a Reynoldsovým číslem potrubí. Proto musí být výpočet hmotnostního průtoku prováděn iteračním způsobem, kdy je v prvním kroku do rovnice (72) dosazeno Reynoldsovo číslo potrubí z níže uvedené podmínky. Pomocí něj je poté stanovena první hodnota hmotnostního průtoku dle vztahu (71), ze které je z rovnice (73) zpětně dopočteno Reynoldsovo číslo potrubí pro druhou iteraci. Tento výpočet probíhá tak dlouho, dokud není splněna zastavovací podmínka, ta je zřejmá z příloženého algoritmu výpočtu, viz příloha. Následujícím vztahem je definována podmínka pro první stanovení Reynoldsova čísla potrubí, kam je průměr potrubí dosazován v milimetrech.

$$Re_D \geq 5000 \wedge Re_D \geq 170 \cdot \beta^2 \cdot D \quad (81)$$

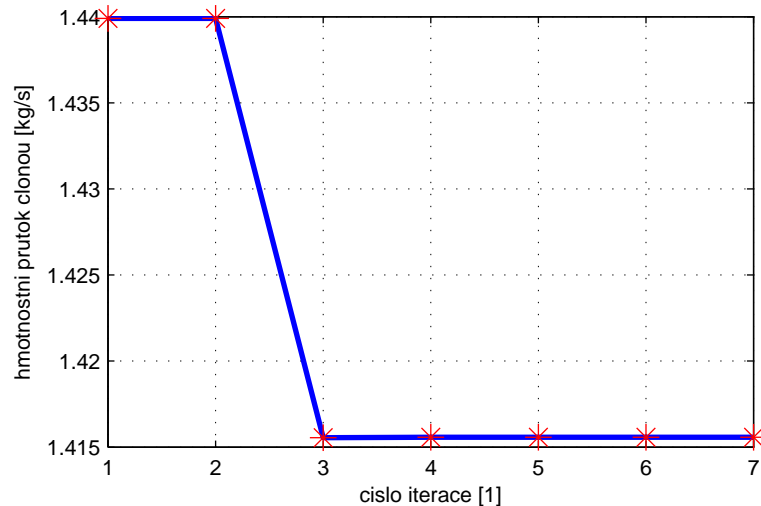
Všechny veličiny z předchozích vztahů a jejich velikosti jsou pro větší přehlednost zaneseny do následující tabulky. U veličin, které se s každou iterací mění, je uvedena jejich hodnota po první iteraci.

Průměr clony	$d = 125 \text{ mm}$
Průměr potrubí	$D = 307 \text{ mm}$
Poměr průměrů clony a potrubí	$\beta = 0,4072 [-]$
Tlak vzduchu před clonou	$p_1 = 87,2107 \text{ kPa}$
Tlak vzduchu za clonou	$p_2 = 68,1748 \text{ kPa}$
Diference tlaku před a za clonou	$\Delta p = p_{dif} = 19,0359 \text{ kPa}$
Plynová konstanta vzduchu	$r = 287,04 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
Teplota vzduchu na cloně	$T = 287,05 \text{ k}$
Hustota vzduchu před clonou	$\rho = 1,0584 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Reynoldsovo číslo potrubí	$Re_{D1} = 8652,28 [-]$
Koeficient A	$A_1 = 0,9144 [-]$
Poměrná vzdálenost L_1	$L_1 = 0,0827 [-]$
Poměrná vzdálenost L_2'	$L_2' = 0,0827 [-]$
Koeficient M_2'	$M_2' = 0,2791 [-]$
Izoentropický exponent vzduchu	$\kappa = 1,4 [-]$
Součinitel expanze	$\varepsilon = 0,9421 [-]$
Dynamická viskozita vzduchu	$\mu = 1,79 \cdot 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$
Součinitel průtoku	$C_1 = 0,6118 [-]$
Hmotnostní průtok	$q_{m1} = 1,4399 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

Tabulka 8: Veličiny potřebné pro stanovení hmotnostního průtoku na cloně

Vývoj hmotnostního průtoku po každé iteraci je vidět na Obr. 11. Výsledná hodnota hmotnostního průtoku clonou je

$$q_m = 1,4156 \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (82)$$



Obrázek 11: Konvergence iteračního výpočtu hmotnostního průtoku clonou

8.1 Nejistota měření hmotnostního průtoku clonou

Vzorcem (83) uvedeným v normě ČSN EN ISO 5167-1 je nejistota měření průtoku clonou δq_m stanovena jako interval přibližného výsledku měření, který může být očekáván, obsahující přibližně 95% rozložení hodnot, které mohly být přiměřeně přisouzeny k měřeným.

$$\frac{\delta q_m}{q_m} = \sqrt{\left(\frac{\delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot \beta^4}{1 - \beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{2}{1 - \beta^4}\right)^2 \cdot \left(\frac{\delta d}{d}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\delta \Delta p}{\Delta p}\right)^2 + \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2} \quad (83)$$

Nejistota součinitele průtoku δC a součinitele expanze $\delta \varepsilon$ je dána normou ČSN EN ISO 5167-2 dle následujících vztahů.

$$\delta C = 0,5\% \cdot C = \pm 3,0075 \cdot 10^{-3} [-] \quad (84)$$

$$\delta \varepsilon = 3,5 \cdot \frac{\Delta p}{\kappa \cdot p_1} [\%] \cdot \varepsilon \quad (85)$$

$$\delta \varepsilon = 0,55\% \cdot \varepsilon = \pm 5,1812 \cdot 10^{-3} [-] \quad (86)$$

Nejistoty průměru potrubí δD a průměru clony δd byly převzaty z příslušných kalibračních listů. Jejich hodnoty jsou

$$\delta D = \pm 0,019 \text{ mm}, \quad (87)$$

$$\delta d = \pm 0,011 \text{ mm}. \quad (88)$$

Nejistota rozdílu tlaku před a za clonou $\delta \Delta p$ byla již stanovena v kapitole 6.1.3 a její velikost je

$$\delta \Delta p = \delta p_{dif} = \pm 0,6045 \text{ kPa}. \quad (89)$$

Poslední dílčí nejistotou potřebnou pro výpočet výsledné nejistoty měření hmotnostního průtoku je nejistota měření hustoty $\delta\rho$ dle vztahu

$$\delta\rho = \sqrt{(A_p \cdot \delta\Delta p)^2 + (A_T \cdot \delta T)^2}. \quad (90)$$

Nejistoty měření teploty δT a měření difference tlaku $\delta\Delta p$ jsou již známy z předchozích výpočtů. Citlivostní koeficienty A_p pro hustotu a A_T pro teplotu budou určeny derivací stavové rovnice (80) jednou dle teploty podruhé dle hustoty, viz níže.

$$A_p = \frac{\partial\rho}{\partial p} = \frac{1}{r \cdot T_1} = 1,214 \cdot 10^{-5} \frac{kg}{J} \quad (91)$$

$$A_T = \frac{\partial\rho}{\partial T} = \frac{-p_1}{r \cdot T_1^2} = 3,688 \cdot 10^{-3} \frac{kg \cdot Pa}{J \cdot K} \quad (92)$$

Po dosazení všech hodnot do rovnice (90) je určena velikost nejistoty měření hustoty.

$$\delta\rho = \pm 0,0119 \frac{kg}{m^3} \quad (93)$$

Výsledná nejistota měření hmotnostního průtoku clonou je odhadnuta dle vztahu (83) po dosazení všech dílčích nejistot uvedených výše.

$$\delta q_m = \pm 0,0261 \frac{kg}{s} \quad (94)$$

Tato hodnota odpovídá relativní nejistotě okolo 1,8% z vypočteného hmotnostního průtoku, hmotnostní průtok je poté zapsán ve tvaru

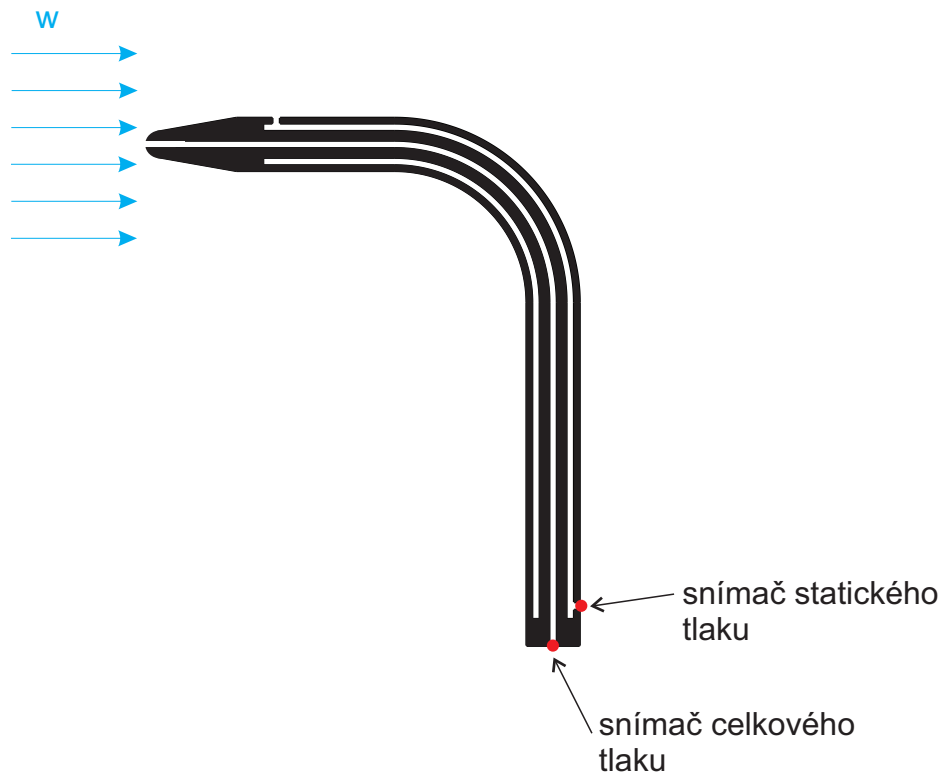
$$q_m = 1,42 \pm 0,03 \frac{kg}{s}. \quad (95)$$

9 Měření rychlosti proudícího vzduchu v měřicím prostoru

Pro měření rychlosti proudícího vzduchu v měřicím prostoru je využíváno Prandltovy sondy, pomocí ní je měřen celkový a statický tlak. Pokud bude rozdíl celkového a statického tlaku označen jako dynamický tlak p_d , je možné pro proudění nestlačitelné tekutiny z Bernoulliho rovnice odvodit pro výpočet rychlosti následující závislost.

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}} \quad (96)$$

Z obrázku níže je zřejmý princip měření tlaků pomocí Prandtlovy sondy. Hustota



Obrázek 12: Schéma Prandtlovy sondy [15]

(měrná hmotnost) je počítána ze stavové rovnice, viz kapitola výpočet hmotnostního průtoku. Rozdíl celkového a statického tlaku je vyhodnocen softwarem, pro toto měření $p_d = 5374,1 \text{ Pa}$, viz Obr. 13 v příloze. Střední hodnota rychlosti pro zaznamenaná data je uvedena na následujícím řádku.

$$w = \sqrt{\frac{2 \cdot 5374,1}{1,0584}} = 100,773 \frac{m}{s} \quad (97)$$

9.1 Nejistota měření rychlosti proudícího vzduchu v měřicím prostoru

Odhad nejistoty měření rychlosti δw je proveden následovně.

$$\delta w = \sqrt{(A_{pd} \cdot \delta p_d)^2 + (A_\rho \cdot \delta \rho)^2} \quad (98)$$

Dílčí nejistota hustoty $\delta \rho$ byla vyšetřena při odhadování nejistoty měření hmotnostního průtoku, dílčí nejistota δp_d je uvažována stejná jako δp_{dif} z měření difference tlaku před a za clonou. Citlivostní koeficienty dynamického tlaku a hustoty jsou opět stanoveny jako derivace rovnice rychlosti (96) dle příslušné veličiny.

$$A_{pd} = \frac{\partial w}{\partial p_d} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{\rho \cdot p_d}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2}{1,0584 \cdot 5374,1}} = 9,376 \cdot 10^{-3} \frac{m}{Pa} \quad (99)$$

$$A_\rho = \frac{\partial w}{\partial \rho} = -\sqrt{\frac{p_d}{2 \cdot \rho^3}} = -\sqrt{\frac{5374,1}{2 \cdot 1,0584^3}} = -47,6062 \frac{\frac{m}{s}}{\frac{kg}{m^3}} \quad (100)$$

Koeficient A_{pd} udává citlivost rychlosti na změnu tlaku a koeficient A_ρ udává citlivost rychlosti na změnu hustoty.

Výsledný odhad nejistoty měření rychlosti proudícího vzduchu je znám po dosazení všech členů do vztahu (98). Odhad nejistoty tohoto měření je uveden s pravděpodobností pokrytí 68,3%, protože koeficient rozšíření je roven jedné.

$$\delta w = \sqrt{(9,3758 \cdot 10^{-3} \cdot 604,5)^2 + (-47,6062 \cdot 0,0119)^2} = \pm 5,696 \frac{m}{s} \quad (101)$$

Tedy

$$w = 100,8 \pm 5,7 \frac{m}{s}. \quad (102)$$

Odhad nejistoty měření rychlosti představuje téměř 5,7% z měřené rychlosti.

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo stanovení odhadu nejistoty měření základních aerodynamických veličin, které se objevují při měření vazebních aerodynamických sil na experimentálním zařízení Katedry energetických strojů a zařízení Západočeské univerzity v Plzni. Byly tedy odhadnuty nejistoty měření difference tlaku před a za clonou, difference tlaku před clonou a barometrickým tlakem, měření teploty proudícího média, měření hmotnostního průtoku clonou a měření rychlosti proudícího média v měřicím prostoru.

Nejprve bylo nutné seznámit se s vlastní problematikou nejistot měření a metodikou jejich odhadování. Zorientování se v problematice nejistot měření, pro čtenáře, který se s tímto termínem setkává poprvé, je časově náročné. Dále byly vyšetřovány způsoby zapojení jednotlivých měřicích zařízení, aby mohly být sestaveny příslušné měřicí řetězce. Protože k experimentálnímu zařízení není dostupná úplná technická dokumentace, která by popisovala způsob zpracování signálu jednotlivých měření, vyšetřování měřicích řetězců bylo pracné a zdlouhavé. Tato část byla ale velmi důležitá, protože opomenutí jednoho nebo více zdrojů nejistot by mělo za následek zkreslení výsledného odhadu nejistoty měření.

Ze získaných výsledků můžeme považovat za přijatelné měření hmotnostního průtoku clonou a difference mezi tlakem před a za clonou. Větší nejistota měření se objevuje při měření difference tlaku před clonou a barometrickým tlakem a také při měření rychlosti v měřicím prostoru. Nejistota, která se svou velikostí zcela liší od předchozích, je nejistota měření teploty proudícího média. Její hodnota zaujímá téměř 20% z hodnoty měřené. Po bližším prozkoumání je patrné, že za největším nárůstem nejistoty měření stojí měřicí karta. Je otázkou, proč zde dochází k takovému nárůstu nejistoty měření, když u jiných měření (tlaku, hmotnostního průtoku) tento nárůst patrný není. Z tohoto důvodu by bylo dobré jinak postavit měřicí řetězec případně zvolit vhodné rozsahy jednotlivých čidel. Je nestandardní, aby mělo čidlo rozsah od -50 do +80 °C, když je měřená teplota proudícího média kolem 14 °C. Zvykem je měřit hodnoty, které se nacházejí v horní třetině rozsahu čidla.

Námětem další práce na aerodynamickém tunelu z pohledu nejistot měření by mohla být změna měřicího řetězce teploty proudícího média. Dále by bylo vhodné změnit nastavené rozsahy čidel, a to jak pro čidlo teploty, tak i pro čidla tlaku. Zajímavé by také bylo upravit vyhodnocovací software tak, aby zaznamenával okamžité hodnoty, díky čemuž by bylo možné odhadnout standardní nejistotu typu A.

Literatura

- [1] Meloun M., Militký J.: *Statistická analýza experimentálních dat*, Praha: Academia Praha, 2004. ISBN 80-200-1254-0
- [2] Palenčák R. a kol.: *Nejistoty v měření I.*, Děčín: Automa 7-8, 2001.
- [3] Palenčák R. a kol.: *Nejistoty v měření II.*, Děčín: Automa 10, 2001.
- [4] Palenčák R. a kol.: *Nejistoty v měření III.*, Děčín: Automa 12, 2001.
- [5] Palenčák R. a kol.: *Nejistoty v měření IV.*, Děčín: Automa 12, 2002.
- [6] Palenčák R. a kol.: *Nejistoty v měření V.*, Děčín: Automa 12, 2002.
- [7] ČSN P ENV 13005: *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [8] Jenčík J., Volf J. a kol.: *Technická měření*, Praha: ČVUT, 2000.
- [9] Kadlec K.: *Snímače tlaku - principy, vlastnosti a použití*, Děčín: Automa 7, 2007.
- [10] Kreidl M.: *Měření teploty, senzory a měřicí obvody*, Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4
- [11] Vojtíšek J.: *Tématické metrologické školení: Nejistoty měření se zaměřením na obor teploty*, Brno: Český metrologický institut, 2013.
- [12] ČSN EN ISO 5167-1: *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky*, Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [13] ČSN EN ISO 5167-2: *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu - Část 2: Clony*, Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [14] Pašek L.: *Proměření a numerický výpočet planparalelního kmitání lopatek. Bakalářská práce*, Plzeň: ZČU, 2014.
- [15] Panuška M.: *Vyšetření torzních aerodynamických vazebních momentů a koeficientů lopatek v kaskádě. Bakalářská práce*, Plzeň: ZČU, 2015.

Webové stránky

- [16] National Instruments: *Absolute Accuracy of Dynamic Signal Acquisition Devices*. [online]. 18.02.2005 [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/BA704FDCBB6C9C4E86256FAC006DB66B>.

Seznam obrázků

1	Grafické znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření [3]	12
2	Rozdělení pravděpodobnosti a koeficienty k [3]	18
3	Schéma experimentálního zařízení	23
4	Schéma měřicího řetězce pro měření difference tlaku na cloně	24
5	Graf závislosti tlaku na napětí pro BHV 5355	24
6	Schéma měřicího řetězce pro diferenci tlaku před clonou a barometrickým tlakem	27
7	Schéma měřicího řetězce pro měření teploty na cloně	27
8	Graf závislosti elektrického proudu na teplotě pro PP200	28
9	Graf závislosti napětí na teplotě pro NI PXI 4472B	31
10	Schéma měření hmotnostního průtoku clonou	32
11	Konvergence iteračního výpočtu hmotnostního průtoku clonou	35
12	Schéma Prandtlovy sondy [15]	37
13	Ukázka z programu	42
14	Bilanční tabulka měření difference tlaku před a za clonou	43
15	Bilanční tabulka měření difference tlaku před clonou a barometrickým tlakem	43
16	Bilanční tabulka měření teploty na cloně	44

Seznam tabulek

1	Hodnoty měření a technické údaje BHV 5355	23
2	Přístrojové zdroje nejistot BHV 5355 a jejich hodnoty	25
3	Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B	25
4	Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B a jejich hodnoty při měření difference tlaku	26
5	Parametry PP200	28
6	Přístrojové zdroje nejistot PP200 a jejich hodnoty	29
7	Přístrojové zdroje nejistot NI PXI 4472B a jejich hodnoty při měření teploty	31
8	Veličiny potřebné pro stanovení hmotnostního průtoku na cloně	34

Příloha A

Měřené hodnoty

Atmosférický tlak Pa

Buzený směr
 Lopatka 1
 Lopatka 2
 Lopatka 3
 Lopatka 4

Měř_FFT

Nová řádka v tabulce měření

Frekvence buzení Hz
 Číslo buzené lopatky

Popis měření
 Č. měření Datum Čas
 Popis

Změřené hodnoty

		I [A]	fi [Hz]	y [mm]	Fy [Hz]	fi [°]	y / I (mm/A)
Lopatka 1	R	0,004 51	70,0000	0,001 21	70,0000	56,732 2	0,268 1
	T	0,000 44	70,0000	0,001 55	70,0000	-73,778 4	3,531 2
Lopatka 2	R	0,004 61	70,0000	0,002 44	70,0000	50,620 4	0,530 3
	T	0,001 94	70,0000	0,000 30	70,0000	23,350 2	0,154 3
Lopatka 3	R	0,015 22	70,0000	0,005 20	70,0000	46,797 9	0,341 9
	T	0,002 57	70,0000	0,000 41	70,0000	50,920 0	0,160 7
Lopatka 4	R	2,037 33	70,0000	0,248 84	70,0000	-161,758 0	0,122 1
	T	0,146 35	70,0000	0,008 80	70,0000	-167,179 0	0,060 1

Průběh

Měření rychlosti

Vzorkování

Ukládání dat

Výpočet FFT

Ukládání FFT

Výpočet amplitud a proudů

Konec

Celkem

Rychlost

	Prandtl	Clona
T	<input type="text" value="15,1"/> °C	<input type="text" value="13,9"/> °C
Pdif	<input type="text" value="-5 374,1"/> Pa	<input type="text" value="19 035,9"/> Pa
Pstat	<input type="text" value="-266,4"/> Pa	<input type="text" value="11 389,3"/> Pa
V	<input type="text" value="98,2"/> m/s	<input type="text" value="125,6"/> m/s
		<input type="text" value="1,90"/> kg/s

Zdroje dat

Vzorkování
 Generování dat do tabulky
 Zpracování dat z tabulky

Uložit

Obrázek 13: Ukázka z programu

Příloha B

Bilanční tabulky

Měřená veličina X:			Tlak p_{dif}		
Změřená hodnota:			19,0359 [kPa]		
Zdroj přístrojové nejistoty z_j	Standardní nejistota dílčího zdroje u_{Bzj}	Typ rozdělení	Výsledná nejistota U_B		
BHV 5355	u_N	0,25 [kPa]	rovnoměrné	0,6045[kPa]	
	u_H	0,075 [kPa]			
	u_O	0,05 [kPa]			
	u_C	0,2085 [kPa]			
	u_P	0,2085 [kPa]			
NI 4472B	u_S	0,015 [kPa]	rovnoměrné		
	u_G	0,2205 [kPa]			
	u_F	0,2205 [kPa]			
Výsledek měření:			$p_{dif} = 19,0359 \pm 0,6045$ [kPa]		

Obrázek 14: Bilanční tabulka měření difference tlaku před a za clonou

Měřená veličina X:			Tlak p_{stat}		
Změřená hodnota:			11,3893 [kPa]		
Zdroj přístrojové nejistoty z_j	Standardní nejistota dílčího zdroje u_{Bzj}	Typ rozdělení	Výsledná nejistota U_B		
BHV 5355	u_N	0,25 [kPa]	rovnoměrné	0,6045[kPa]	
	u_H	0,075 [kPa]			
	u_O	0,05 [kPa]			
	u_C	0,2085 [kPa]			
	u_P	0,2085 [kPa]			
NI 4472B	u_S	0,015 [kPa]	rovnoměrné		
	u_G	0,2205 [kPa]			
	u_F	0,2205 [kPa]			
Výsledek měření:			$p_{dif} = 11,3893 \pm 0,6045$ [kPa]		

Obrázek 15: Bilanční tabulka měření difference tlaku před clonou a barometrickým tlakem

Měřená veličina X:		Teplota t	
Změřená hodnota:		13,9 [°C]	
Zdroj přístrojové nejistoty z_j	Standardní nejistota dílčího zdroje u_{Bzj}	Typ rozdělení	Výsledná nejistota U_B
PP 200	u_{Pt}	0,1778 [°C]	2,5296 [°C]
	u_N	0,15 [°C]	
	u_T	0,65 [°C]	
	u_L	0,065 [°C]	
	u_I	0,0023 [°C]	
	u_D	0,0104 [°C]	
R	u_R	0,8446 [°C]	rovnoměrné
NI 4472B	u_S	0,0488 [°C]	rovnoměrné
	u_G	1,1164 [°C]	
	u_F	1,1164 [°C]	
Výsledek měření:		$t = 13,9 \pm 2,5 [°C]$	

Obrázek 16: Bilanční tabulka měření teploty na cloně

Příloha C

Algoritmus pro výpočet hmotnostního průtoku

```
clear; clc

d = 0.125;
D = 0.307;
beta = d/D;
p1 = 87210.7;
p2 = 68174.8;
pd=p1-p2;
r = 287.04;
T1 = 287.05;
ro = p1/(r*T1); %hustota

Red(1)=170*beta.^2*D*1000;

if Red<5000
    Red=5000;
end

A(1) = ((19000*beta)/Red)^0.8;
L1 = 0.0254/0.307;
L2 = L1;
M2 = (2*L2)/(1-beta);
k = 1.4; %kapa
eps = 1-(0.351+0.256*beta^4+0.93*beta^8)*(1-(p2/p1)^(1/k)); %soucinitel expanze
mu = ((2.48982*1e-5)/(T1+122))*sqrt(T1^3/273.15); %dynamicka viskozita tekutiny

i = 1;
qm = 0;

C0(i) = 0.5961+0.0261*beta^2-0.216*beta^8+0.000521*(1e6*beta/Red)^0.7+ ...
(0.0188+0.0063*A(i))*beta^3.5*(1e6/Red)^0.3+(0.043+0.080* ...
exp(-10*L1)-0.123*exp(-7*L1))*(1-0.11*A(i))*beta^4/(1-beta^4)- ...
0.031*(M2-0.8*M2^1.1)*beta^1.3; %soucinitel prutoku

qm(i) = (C0(i)/sqrt(1-beta^4))*eps*(pi/4)*d^2*sqrt(2*pd*ro);

while true
    i=i+1;

    C0(i) = 0.5961+0.0261*beta^2-0.216*beta^8+0.000521*(1e6*beta/ ...
Red(i-1))^0.7+(0.0188+0.0063*A(i-1))*beta^3.5*(1e6/Red ...
(i-1))^0.3+(0.043+0.080*exp(-10*L1)-0.123*exp(-7*L1))* ...
(1-0.11*A(i-1))*beta^4/(1-beta^4)-0.031*(M2-0.8*M2^1.1) ...
*beta^1.3;

    qm(i)= (C0(i)/sqrt(1-beta^4))*eps*(pi/4)*d^2*sqrt(2*pd*ro);

    Red(i) = 4*qm(i)/(pi*mu*D);
```

```
A(i) = ((19000*beta)/Red(i))^0.8;

if(abs(Red(i)-Red(i-1)))<=0.000001
    break;
end
end

clc
display(['Hmotnostni prutok je ',num2str(qm(end),'% 10.4f'),' kg/s.'])
display(['Probehlo ',num2str(i),' iteraci.'])

figure( )
hold on; grid on; box on
plot(qm,'b','linewidth',2)
plot(qm,'*r','markersize',10)
xlabel('cislo iterace [1]')
ylabel('hmotnostni prutok clonou [kg/s]')
```

Příloha D

Technická specifikace DTS BHV 5355

DIFERENČNÍ TLAKOVÉ SNÍMAČE BHV 5355 přesné a robustní

- rozsahy od 200 Pa do 600 kPa
- provedení odolné proti vodě i prachu
- možnost volby výstupního signálu
- vysoká přetížitelnost
- dlouhodobá stabilita
- otřesuvzdornost
- pracovní rozsah od -100% do +100%



Snímače BHV 5355 jsou určeny ke snímání přetlaku, podtlaku a tlakové difference plynů a kapalin neagresivních vůči korozivzdorné oceli ČSN 17 027. Tyto snímače jsou vhodné zejména pro měření malých tlakových diferencí ve vzduchotechnice, v technice životního prostředí a ve vytápěcí a klimatizační technice.

Používají se např. k měření objemových průtoků pomocí rychlostních sond, ke zjišťování komínových tahů a k indikaci provozních stavů v odsávacích a filtračních systémech. Jedná se o výrobek, který nalezne využití jak v systémech průmyslové automatizace, tak i při laboratorním měření.

Technické údaje			zvl. požadavek
Jmenovitý rozsah 0 ...	kPa	0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100,, 600	jiný rozsah
Přetížitelnost		200krát, maximálně do 600 kPa	
Maximální statický tlak		600 kPa	4 MPa
Nelinearita	%FS	≤ 0,5	≤ 0,25
Hystereze	%FS	≤ 0,15	
Reprodukovatelnost	%FS	≤ 0,1	
Vliv teploty:			
- na citlivost	%FS / 10°C	≤ ± 0,3, (≤ ± 0,5 ^{x)}	≤ ± 0,2
- na posunutí nuly	%FS / 10°C	≤ ± 0,3, (≤ ± 0,5 ^{x)}	≤ ± 0,2
Napájení - DC napětí	V	+15 .. +32 / 50 mA - třívodič	
Vstupní signál			
- DC A	mA	0 .. 20 / 4 .. 20 / 20 .. 4; Rz ≤ 500 Ω	
- DC V	V	0 .. +5 / -5 .. +5; Rz ≥ 1000 Ω	
Rychlost odezvy	ms	500	50
Krytí		IP 65	
Teplota prostředí:			
- pracovní	°C	-5 ... +55	-20 ... +65
- skladovací	°C	-25 ... +80	
		^{x)} platí pro rozsahy do 900 Pa	

BHV 5355

Příloha E

Technická specifikace programovatelného převodníku teploty PP200

Čapkova 22
678 01 Blansko
tel.: +420 516 416942, 419995
fax: +420 516 416963

PROGRAMOVATELNÝ PŘEVODNÍK TEPLoty



- PP200 se montuje do hlavice teploměru rozměr DIN „B“
- jednoduché programování rozsahu adaptérem AX-USB / PK-USB bez potřeby přídavného napájení
- převodník bez galvanického oddělení převádí teploty z odporového teploměru RTD na unifikovaný výstupní signál 4-20mA
- převodník je možné naprogramovat pro typy čidel: Pt100, Pt1000, Ni 100, Ni1000, KTY81 (-55..110°C)

Elektrické parametry přístroje

- vstupní signál: Pt100, 1000 dle IEC 751(-55...+645°C); Ni 100, Ni1000 (-40..+180°C); KTY81... libovolný, min. rozpětí 10°C
- nastavitelný měřicí rozsah < 0,15°C
- přesnost: chyba nastavení < 0,05°C/10°C
- teplotní chyba < 0,05% z nastaveného rozsahu (min: 0,1°C při 15 bit. a 0,16°C při 14 bit. rozlišení)
- chyba linearity < 0,005%/V z rozsahu (max. 0,2°C)
- vliv napájecího napětí bez vlivu pro 3 vodičové zapojení
- vliv odporu přívodu 14 nebo 15bit/12bit -programově volitelné
- rozlišení vstup/výstup: 3 nebo 2 vodičové -programově volitelné
- připojení vstupu: < 20 Ω /1 vodič
- max. odpor přívodu: zkrat čidla: < 3,2mA, přerušení čidla: >22,7mA
- proudové omezení: <0,6mA (střední hodnota)
- proud čidlem 0 .. 30 s (programově nastavitelné) firemní nastavení 0,3s
- tlumení 202 - 810 ms (viz Tabulka 1)
- perioda vzorkování teploty: -25...+ 80°C
- rozsah pracovních teplot: 8... 28V DC po výstupním signálu 4-20mA
- napájecí napětí: 4-20mA lineární s teplotou
- výstupní signál: IP68 / IP10 do hlavice
- stupeň krytí skříně / svorkovnice: AX-USB, PK-USB + programovací software zdarma
- programovací adaptér USB
- uživatelská linearizace

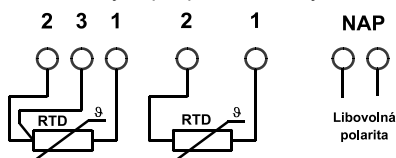
Tabulka 1

perioda vzorkování teploty (doba měření)

	2 vodič.	3 vodič.
14ti bit. Vstup	202 ms	412 ms
15ti bit. Vstup	404 ms	810 ms

Typové zkoušky: Základní typová zkouška dle: ČSN EN 60770-1 ed.2
EMC posouzeno dle: ČSN EN 61326-1
Bezpečnost posouzena dle: ČSN EN 61010-1

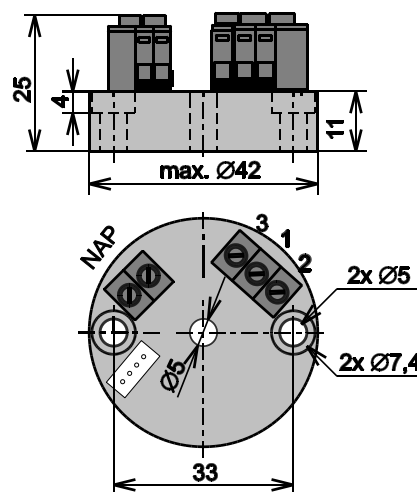
Zapojení svorek: 1, 2: čidlo Pt100 (2-vodičové)
3: kompenzační přívod Pt100 pro 3-vodičové zapojení
NAP: výstupní proudová smyčka bez rozlišení polarit



Objednávání: V objednávce je nutno uvést:
- typ PP200
- počet kusů
- nastavení (např. 2 vodič, Pt100 -10 až 120°C, tlumení 1s)

Montáž: Do svorek lze připojit vodiče do průřezu 2,5mm². Doporučujeme použít kabel s průřezem žíly od 0,5mm² v zaručeném prostředí doporučujeme stíněný kabel.

Rozměrový náčrt PP200:



Likvidaci po ukončení životnosti provést odděleným sběrem.
Rawet s.r.o. je členem sdružení RETELA www.retela.cz

Příloha F

Technická specifikace měřicí karty NI PXI 4472B

24-Bit, 102.4 kS/s, 8- and 4-Channel Dynamic Signal Acquisition

NI 4472 Series, NI PCI-4474

- 24-bit resolution
- 110 dB dynamic range
- 102.4 kS/s maximum sampling rate
- 45 kHz alias-free bandwidth
- ± 10 V range
- AC/DC coupling
- IEPE conditioning – software configurable
- Multiple-device synchronization

Operating Systems

- Windows XP/2000/NT
- LabVIEW Real-Time

Recommended Software

- LabVIEW
- Sound and Vibration Toolkit
- Sound and Vibration Measurement Suite
- LabWindows™/CVI
- Measurement Studio

Measurement Services Software (included)

- NI-DAQmx



Applications

- Noise and vibration diagnostics
- Audio test and measurement
- Machine condition monitoring
- Sound power
- Telecommunications testing
- Structural vibration
- Pass-by noise

Overview

The National Instruments PCI-4472 and PXI-4472 are 8-channel dynamic signal acquisition devices for making high-accuracy audio-frequency measurements. The PCI-4474 is a similar 4-channel board.

The vibration-optimized NI PXI-4472B offers a lower AC cutoff frequency of 0.5 Hz. Input channels incorporate Integrated Electronic Piezoelectric (IEPE) signal conditioning for accelerometers and microphones. The input channels of an NI 447x simultaneously digitize input signals over a bandwidth from DC to 45 kHz. You can synchronize multiple NI 447x devices for high-channel-count applications, or with other modules using the PXI star trigger bus or the RTSI bus on PCI. When used with the Sound and Vibration Toolkit or other software analysis tools, an NI 447x can obtain a variety of accurate time and frequency measurements for your application.

Device	Bus	Analog Inputs	Resolution	Sampling Rate	Input Range	Triggering	AC Cutoff Frequency
NI 4472	PCI, PXI	8	24 bits	102.4 kS/s	± 10 V	Analog and digital	3.4 Hz
NI 4472B	PCI, PXI	8	24 bits	102.4 kS/S	± 10 V	Analog and digital	0.5 Hz
NI 4474	PCI	4	24 bits	102.4 kS/S	± 10 V	Analog and digital	3.4 Hz

Table 1. NI 447x Channel, Speed, and Resolution Specifications

Hardware

Analog Inputs

NI 447x devices have four or eight analog inputs with 24-bit resolution ADCs that are simultaneously sampled at a software-programmable rate. The high resolution provides the necessary accuracy to make NI 447x devices well-suited for audio and vibration analysis applications.

You can achieve outstanding measurements with an NI 447x. For example, when sampling at 51.2 kS/s and using a 16 k FFT, you can achieve a dynamic range greater than 110 dB. Using state-of-the-art delta-sigma modulating ADCs, the NI 447x devices deliver low noise and low distortion. Because these ADCs use a 1-bit quantizer oversampled at a multiple of the specified sampling rate, they produce extraordinary linearity. Extremely flat, linear-phase, lowpass digital filters then remove aliases and shape the quantization noise from the band of interest. Using the delta-sigma modulating ADCs, an NI 447x is immune to the DNL distortion associated with conventional data acquisition devices.

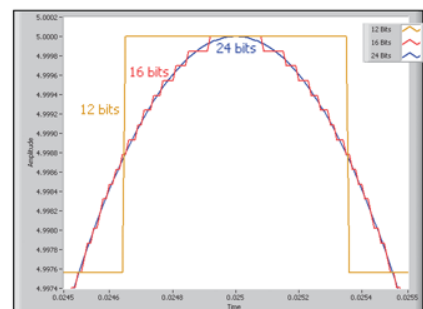


Figure 1. The 24-bit architecture of the NI 447x devices delivers more than 110 dB dynamic range and a significantly lower noise floor than 12- and 16-bit and comparable 24-bit products.

24-Bit, 102.4 kS/s, 8- and 4-Channel Dynamic Signal Acquisition

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise noted.

Analog Input

Channel Characteristics

Number of channels	
NI 4472 Series	8, simultaneously sampled
NI 4474 Series	4, simultaneously sampled
Input configuration	Unbalanced differential
Resolution	24 bits, nominal
Type of ADC	Delta-sigma
Oversampling, for sample rate (f_s):	
1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s	128 f_s
51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s	64 f_s
Sample rates (f_s)	1.0 to 102.4 kS/s in 190.7 μ S/s increments for $f_s > 51.2$ kS/s or 95.36 μ S/s increments for $f_s \leq 51.2$ kS/s
Frequency accuracy	± 25 ppm
Input signal range	± 10 V peak
FIFO buffer size	1,024 samples
Data transfers	DMA

Transfer Characteristics

Offset (residual DC)	± 3 mV, max
Gain (amplitude accuracy)	± 0.1 dB, max, $f_{in} = 1$ kHz

Amplifier Characteristics

Input impedance (ground referenced)	
Positive input	1 M Ω in parallel with 60 pF
Negative input (shield)	50 Ω in parallel with 0.02 μ F
Flatness (relative to 1 kHz)	± 0.1 dB, DC to 0.4535 f_s , max, DC-coupled
-3 dB bandwidth	0.4863 f_s
Input coupling	AC or DC, software-selectable
AC -3 dB cutoff frequency	
NI 4472, NI 4474	3.4 Hz
NI 4472B	0.5 Hz
Overvoltage protection	
Positive input	± 42.4 V
Positive inputs protected	CH<0..7>
Negative input (shield)	Not protected, rated at ± 2.5 V
Common-mode rejection ratio (CMRR)	
$f_{in} < 1$ kHz	> 60 dB, minimum

Dynamic Characteristics

Alias-free bandwidth (passband)	DC (0 Hz) to 0.4535 f_s
Stop band	0.5465 f_s
Alias rejection	110 dB
Spurious-free dynamic range	130 dB, 1.0 kS/s $\leq f_s \leq 51.2$ kS/s

118 dB, 51.2 kS/s $< f_s \leq 102.4$ kS/s THD, $f_{in} = 1$ kHz	
0 dBFS input	< -90 dB
20 dBFS input	< -100 dB
60 dBFS input	< -60 dB
IMD	< -100 dB (CCIF 14 kHz + 15 kHz)
Crosstalk ¹ (channel separation), $f_{in} = 0$ to 51.2 kHz	
Between channels 0 and 1, 2 and 3, 4 and 5, or 6 and 7	
Shorted input	< -90 dB
1 k Ω load	< -80 dB
Other channel combinations	
Shorted input	< -100 dB
1 k Ω load	< -90 dB
Phase linearity	$\leq \pm 0.5$ deg
Interchannel phase mismatch	$< f_{in}$ (in kHz) $\times 0.018$ deg + 0.082 deg
Interchannel gain mismatch	± 0.1 dB
Filter delay through ADC	38.8 sample periods

Onboard Calibration Reference

DC level	5.000 V ± 2.5 mV
Temperature coefficient	± 5 ppm/ $^{\circ}$ C maximum
Long-term stability	± 20 ppm/ $\sqrt{1,000}$ h

Signal Conditioning

Constant current source (software-controlled)	
Current	4 mA, $\pm 5\%$
Compliance	24 V
Output impedance	> 250 k Ω at 1 kHz
Current noise	< 500 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$

Triggers

Analog Trigger

Source	CH<0..7>
Level	-10 to +10 V, full scale, programmable
Slope	Positive or negative (software-selectable)
Resolution	24 bits, nominal
Hysteresis	Programmable

Digital Trigger

Compatibility	5 V TTL/CMOS
Response	Rising or falling edge
Pulse width	10 ns, minimum
Bus Interface	
Type	Master, slave

Power Requirements

+3.3 VDC	
PXI	400 mA, maximum
+5 VDC	
PCI	2.6 A, maximum
PXI	2.2 A, maximum
+12 VDC	120 mA, maximum
-12 VDC	120 mA, maximum

BUY ONLINE at ni.com or CALL 800 813 3693 (U.S.)