

Calibration of a Five Hole Probe and Calibration Data Processing

Petr Pick,

Ing., Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky, Fakulta strojní, ČVUT v Praze,
Technická 4, PSČ 166 07, Praha, pickpetr@fs.cvut.cz

Abstract:

The present contribution summarizes how to make calibration of a five hole cobra probe and how to post-process the calibration data so as to use it directly in measurement. The following issues are dealt with: the process of calibration on a calibration stand, calibration data processing, and the interpolation of calibration data by polynomial model. A practical example of interpolation optimization is given being based on a change of degree of interpolation polynomials. Subsequently, the contribution presents the way to recalculate interpolation data to a format by means of which the direction of the current measured by the probe can be determined as well as the overall static pressure of it. The output parameters, which are obtainable via the measurement through a five hole cobra probe, are also described.

Keywords: multi hole probe, calibration, five hole probe, data processing, interpolation,

1. Použité označení

κ - bezrozměrný součinitel směrové sondy
 α - úhel náběhu sondy
 β - úhel vybočení sondy
 c_p - tlakový součinitel
 p_{cRef} - referenční celkový tlak na etalonové sondě
 p_{sRef} - referenční stěnový odběr statického tlaku
A,B,C,D – konstanty které jsou nahrazeny polynomy
E,F,G,H,I,J,K,L – konstanty nahrazovaných polynomů

Indexy:

α - pro úhel alfa
 β - pro úhel beta
 λ - velikost rychlosti nabíhajícího proudu
1,3,4,5 – boční tlakový odběr sondy
2 – tlakový odběr sondy – celkový tlak
ss – střední tlak
c – celkový tlak na etalonové sondě
s – statický tlak na stěně tunelu
S – statický tlak
0 - celkový tlak (u součinitele κ)
d – dynamický tlak

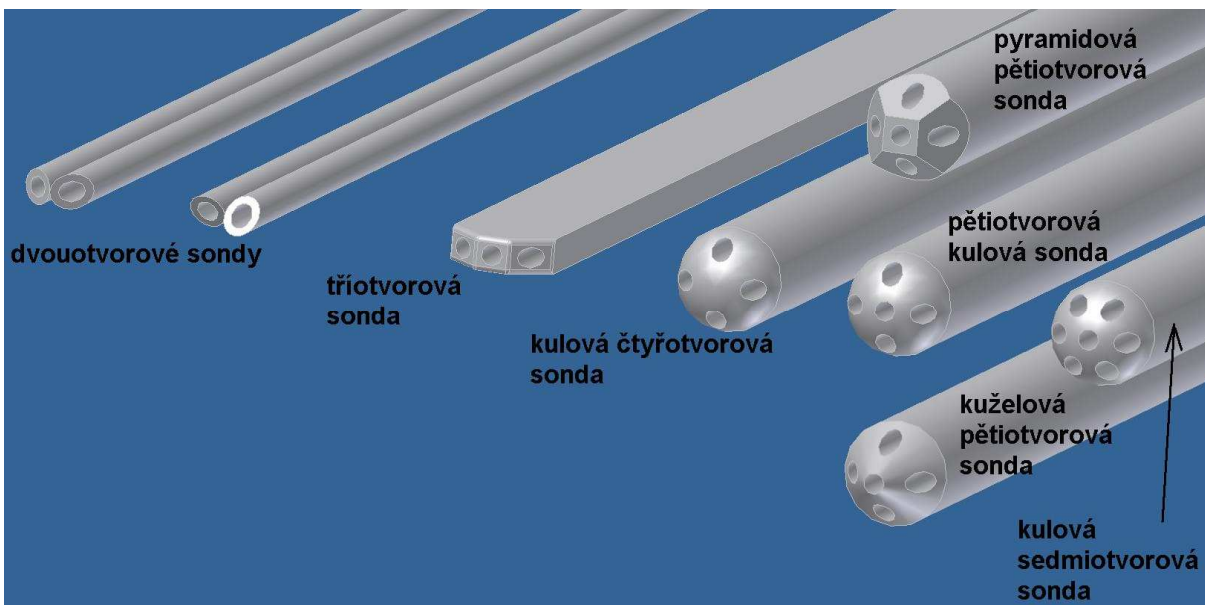
2. Úvod

Pětivotvorová sonda umožňuje provádět měření rychlosti a směru proudu nabíhající tekutiny, pokud tento směr není mimo oblast požadované směrové citlivosti sondy. Konstrukce směrové sondy se liší podle účelu a informací, které chceme o místě měření získat. Směrové sondy mohou být:

- Dvouotvorové pro měření nabíhajícího proudu v jedné rovině,
- Tříotvorové pro měření v jedné rovině spolu s celkovým tlakem,
- Čtyřotvorové pro měření ve dvou rovinách
- Pětivotvorové pro měření ve dvou rovinách s celkovým tlakem
- Sedmi, dvanácti i osmnácti otvorové pro přesnější určení směru nabíhajícího proudu tekutiny ve dvou rovinách.

Zatímco pitot-statická sonda je citlivá v úhlu náběhu proudu 10° , pětivotvorová sonda je limitována úhlem náběhu 55° a sedmiotvorová sonda úhlem náběhu 75° . Pro vyšší úhly se využívají dvanácti a osmnácti otvorové sondy. Ukázka sond je na obrázku 1.

Sondy se využívají pro měření v širokém rozsahu rychlostí od nízkých subsonických (5m/s), přes vysoké subsonické, transsonické a dokonce i supersonické rychlosti (i Mach 3). Při vysokých subsonických a vyšších rychlostech je však výrazný problém s chybou měření, kterou ovlivňuje vznikající rázová vlna na sondě. Z tohoto důvodu se používá pro vyšší rychlosti méně citlivý kuželový tvar špičky sondy. Důležitá je též citlivost sondy na Reynoldsovo číslo. Se stoupající rychlostí tekutiny nastává odtrhávání proudění na měřicí ploše sondy, což významně ovlivňuje tlaky měřené v místech tlakových odběrů. Sondy s kulovou měřicí částí jsou na tento jev více citlivé, než sondy s pyramidovou, ovšem je lépe možno měřit nestacionární jevy (na kulové části sondy nastává separace postupně, zatímco na pyramidové sondě nastává odtržení hned na hraně a za ní už je turbulentní odtržení).



Obrázek 1, typy víceotvorových směrových sond. Zleva doprava: dvouotvorová sonda, kolmá rovina, dvouotvorová sonda, vodorovná rovina, tříotvorová sonda, kolmá rovina, čtyřotvorová sonda, první shora pětivotvorová pyramidová sonda, pětivotvorová

sonda kulová, pětiotvorová sonda kuželová, poslední z leva kulová sedmiotvorová sonda.

Konstrukční provedení těla sondy bývá převážně trojí - přímé, do L, a typ kobra. Výhodou sondy typu kobra je, že při jejím natáčení zůstává zachován měřící bod (pokud se natáčí sondou L, měřící body při natáčení sondy podél osy těla tvoří kružnici). Proto je možné sondu v tunelu směřovat a určit úhel nabíhajícího proudu vyrovnáním tlakových odběrů na levé i pravé straně ve směru osy otáčení sondy a následně určit úhel pomocí mechanického odečtu (aripot). Tohoto jevu je možné s úspěchem využít při ustavování sondy do kalibračního přípravku pro její nasměrování rovnoběžně s prouděním. Sonda typu kobra je na obrázku 2.

Volba tvaru a konstrukce sondy má přímý vliv na charakteristiku sondy. Pokud existuje počáteční charakteristika sondy, její porovnání s novou charakteristikou získanou při další kalibraci může zkušenému pracovníkovi odhalit kondici sondy, zda je více či méně ucpaná, je-li její geometrický tvar beze změn.

Vhodnou volbou tvaru a konstrukce sondy lze ovlivnit citlivost sondy i složitost zpracování kalibračních dat. Pro určitý maximální rozsah úhlů náběhu tekutiny lze získat kalibrační charakteristiku blízkou lineární. Díky tomu lze pak z několika hodnot dopočítat data, která nebyla měřena, ovšem je třeba ujistit se, že se výpočet provádí pro interval, ve kterém je lineární závislost jistá. Data získaná při kalibraci je pro následné využívání nutno zpracovat do snadno použitelného tvaru. Mezistupněm tohoto použitelného tvaru je kalibrační matice pro danou rychlost sondy, pro více rychlostí pak vzniká soustava matic, ve kterých je vyhodnocení prováděno. Konečným tvarem je soustava takových matic, do kterých vstupují data získaná sondou a vystupují požadované hodnoty (úhel nastavení alfa, vybočení beta, rychlost nabíhajícího proudu, statický a celkový tlak). Na náročnost tvorby těchto matic má velký vliv linearita charakteristik úhlů náběhu a vybočení. Pokud je možné tyto dvě charakteristiky linearizovat, je velmi snadné provádět vyhodnocení naměřených dat. V další části příspěvku bude tento postup naznačen.

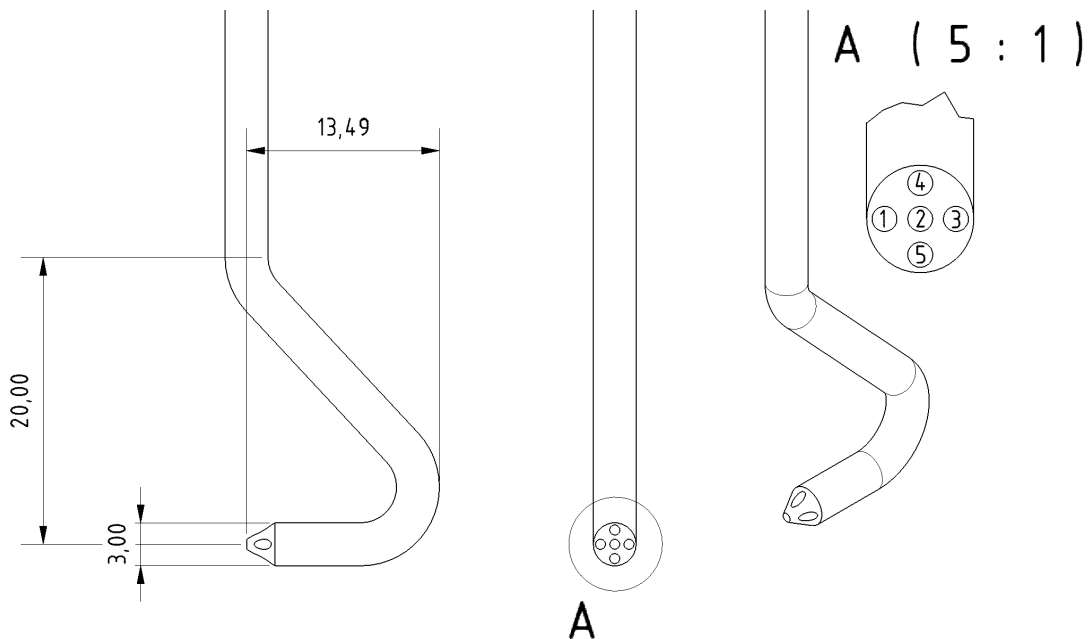
Před vlastním měřením je nutno uvážit požadované informace, které chceme získat z proudu tekutiny. Pokud se jedná o nestacionární data, fluktuace a rychlé jevy v tekutině, je třeba mít na paměti tlumící vliv délky vývodů z tlakových odběrů sondy. Při dostatečně dlouhých tlakových odběrech je totiž možno měřit pouze střední hodnoty rychlosti a průměrný směr nabíhajícího proudu. Pokud je třeba znát časový průběh směru nabíhajícího proudu a jeho rychlost, lze využít sondy, které obsahují miniaturní tlakové snímače přímo uvnitř měřící špičky (např. [6]). Tomto způsobem je možno měřit děje frekvencí až 20kHz.

3. Experimentální vybavení:

Kalibrace pětiotvorové kuželové sondy typ kobra (obr. 1) byla provedena na aerodynamické trati v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní, ČVUT. Aerodynamická trať byla pro kalibraci sondy vybavena kalibračním

přípravkem umožňujícím natačení sondy ve dvou na sebe kolmých osách. Kalibrace byla prováděna při rychlosti 10m/s a 15m/s.

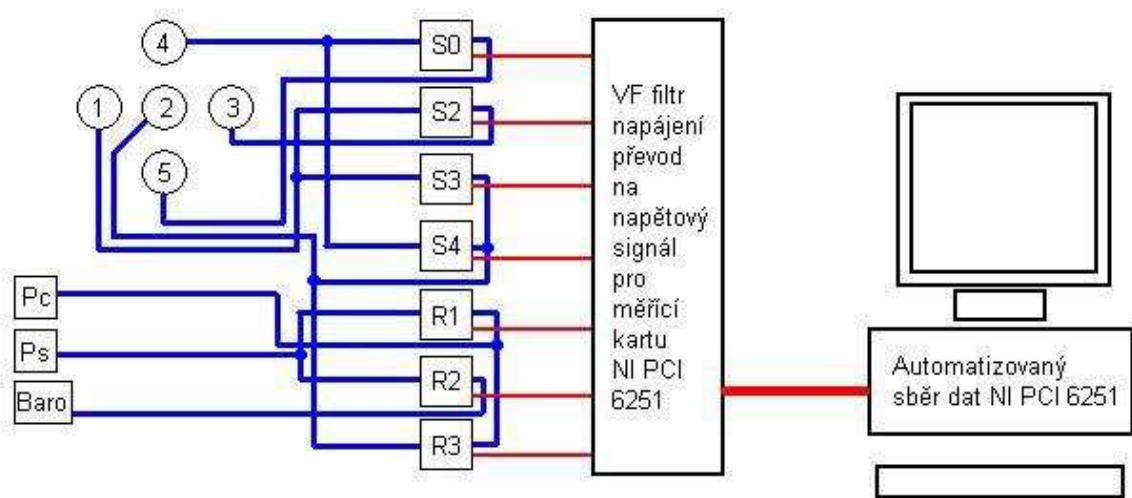
Pro kalibraci byla použita sada tlakových snímačů Rosemount DR2 kalibrovaných v rozsahu 0-1500Pa a ± 600 Pa a snímačů Setra 265 kalibrovaných rozsahu ± 125 Pa. Pro měření byla využita měřicí karta National Instruments PCI 6251 a programy vytvořené v programovém prostředí LabView 9.0 pro automatizovaný sběr a vyhodnocení dat.



Obrázek 2, pětiorovová sonda typ kobra, včetně popisu tlakových odběrů, tato sonda byla kalibrována.

Schéma měření je na obrázku 3.

Souřadný systém byl určen podle obrázku 4.



Obrázek 3, vyobrazení zapojení tlakových odběrů 1-5, celkového tlaku P_c , statického tlaku P_s a barometrického tlaku, na tlakové snímače Rx Sy, následně do úpravy signálu a osobního počítače.

4. Metody vyhodnocení kalibračních dat

Kalibrace sondy byla provedena podle metodiky British standards, zpracováno podle [2]. Kalibrace byla prováděna pro rychlost 10ms^{-1} a pro rychlost 15ms^{-1} . Kalibrační data byla též zpracována podle [4] pro následné porovnání charakteristik. Popišme si blíže oba postupy:

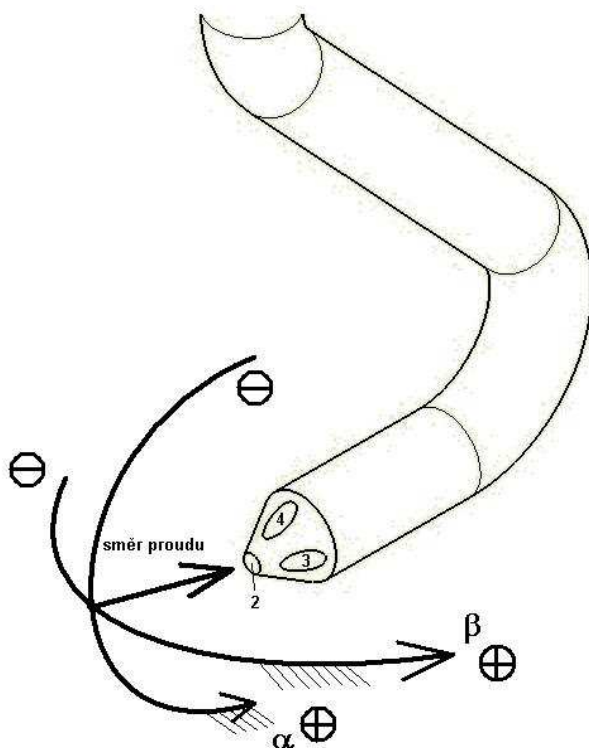
Podle postupu [2] jsou definovány parametry κ :

$$\kappa_\lambda = \frac{p_2 - p_{ss}}{p_c - p_s} \quad (1)$$

$$\kappa_0 = \frac{p_c - p_2}{p_2 - p_{ss}} \quad (2)$$

$$\kappa_\alpha = \frac{p_3 - p_1}{p_2 - p_{ss}} \quad (3)$$

$$\kappa_\beta = \frac{p_4 - p_5}{p_2 - p_{ss}} \quad (4)$$



Obrázek 4, smysl a orientace úhlů náběhu proudu na sondu. Sonda se otáčí, systém zůstává v klidu.

kde tlaky p_1, p_3, p_4, p_5 jsou boční odběry a tlak p_2 je odběr celkového tlaku pětivotvorové sondy (viz obr. 2). Tlak $p_{ss} = (p_1 + p_2 + p_3 + p_4)/4$ je střední tlak na bočních odběrech 1, 3, 4 a 5 pětivotvorové sondy a p_c je celkový a p_s je statický tlak v místě sondy podle údajů etylénové sondy. Charakteristika pětivotvorové sondy byla získána pro rozsah úhlů α a $\beta \pm 15^\circ$, kde úhel náběhu α je na sondě orientován podle obrázku 4 mezi tlakovými odběry p_4 a p_5 a úhel vybočení β mezi tlakovými odběry p_1 a p_3 . Díky vhodnému uspořádání sondy a držáku bylo možné popsat získané kalibrační konstanty pro jednotlivá natočení rovnicemi, z nichž lze dopočítat všechny body v daném rozsahu úhlů α a β (obr 5,6). Nazvěme tuto metodu metodou A.

Druhý postup zpracování hodnot naměřených během kalibrace (podle metodiky [4]) definuje tlakové součinitele c_p :

$$c_{p\alpha} = \frac{p_3 - p_1}{p_{cRef} - p_{sRef}} \quad (5)$$

$$c_{p\beta} = \frac{p_4 - p_5}{p_{cRef} - p_{sRef}} \quad (6)$$

$$c_{pd} = \frac{p_2 - p_{ss}}{p_{cRef} - p_{sRef}} \quad (7)$$

$$c_{ps} = \frac{p_{sRef} - p_{ss}}{p_{cRef} - p_{sRef}} \quad (8)$$

$$c_{pc} = \frac{p_{cRef} - p_2}{p_{cRef} - p_{sRef}} \quad (9)$$

Tento postup se liší novým parametrem c_{ps} vyjadřujícím rozdíl statického tlaku a středního tlaku. Další významnou změnou je využití referenčního statického a celkového tlaku. Tyto hodnoty implikují nutnost měřit tyto veličiny při využívání sondy. Jaký má využití těchto veličin vliv na citlivost kalibračních charakteristik bude možné vidět při porovnání charakteristik. Tuto metodu budeme nazývat metodou B.

5. Vyhodnocení kalibračních dat

Z kalibrační charakteristiky je patrná závislost α na κ_α a β , a β na κ_β a α . Lze proto odvodit pro úhly α a β :

$$\alpha(\kappa_\alpha, \beta) = p(\beta) \cdot \kappa_\alpha + q(\beta), \quad (10)$$

$$\beta(\kappa_\beta, \alpha) = u(\alpha) \cdot \kappa_\beta + v(\alpha), \quad (11)$$

kde p a q , u a v jsou proměnné závislé na α resp. na β . Tyto proměnné lze vyjádřit polynomem takového stupně, aby charakteristika byla co nejlépe proložena.

Předpokládáme-li lineární průběh charakteristiky u součinitelů κ_α a κ_β můžeme tedy napsat že:

$$\alpha = A\kappa_{\alpha} + B \quad (12)$$

$$\beta = C\kappa_{\beta} + D \quad (13)$$

A pro konstanty A, B, C a D najít náhrady opět v polynomiálním tvaru, v našem případě je náhrada lineární.

$$A = E + F\beta$$

$$B = G + H\beta$$

$$C = I + J\alpha$$

$$D = K + L\alpha \quad (15)$$

Tím získáme 8 koeficientů E,F,G,H,I,J,K a L pro celou charakteristiku. Z těchto koeficientů následně můžeme odvodit vztah pro funkční závislost

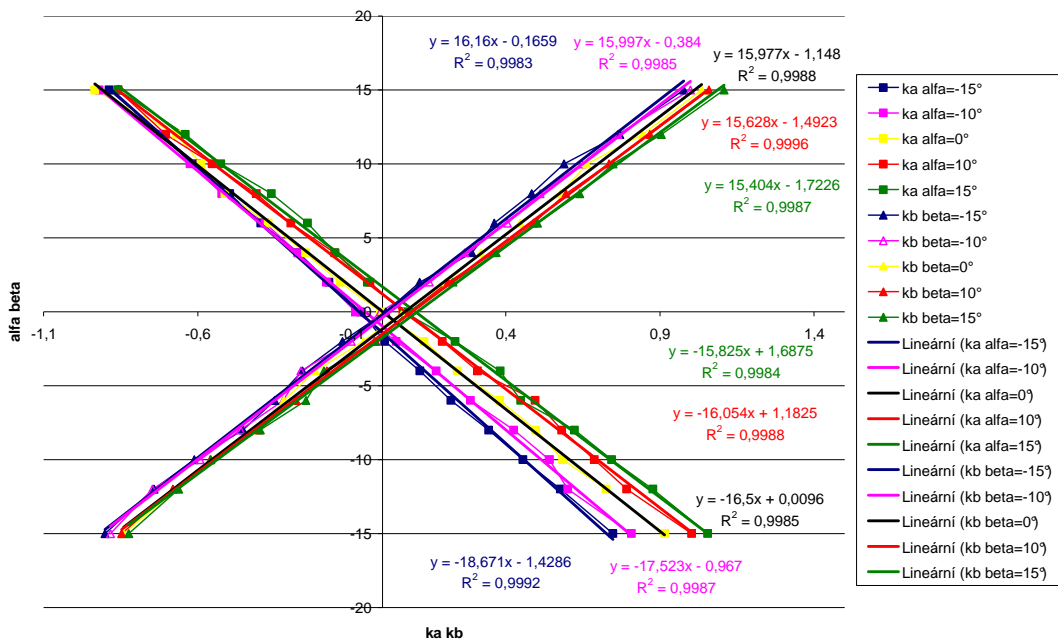
$$\alpha = \alpha(\kappa_{\alpha}, \kappa_{\beta}); \beta = \beta(\kappa_{\beta}, \kappa_{\alpha}) \quad (16)$$

Tyto dva vztahy jsou velmi užitečné pro použití sondy při dalším měření. Na základě získaných úhlů α a β již z dalších charakteristik snadno získáváme hodnoty statického tlaku, celkového tlaku i rychlosti tekutiny.

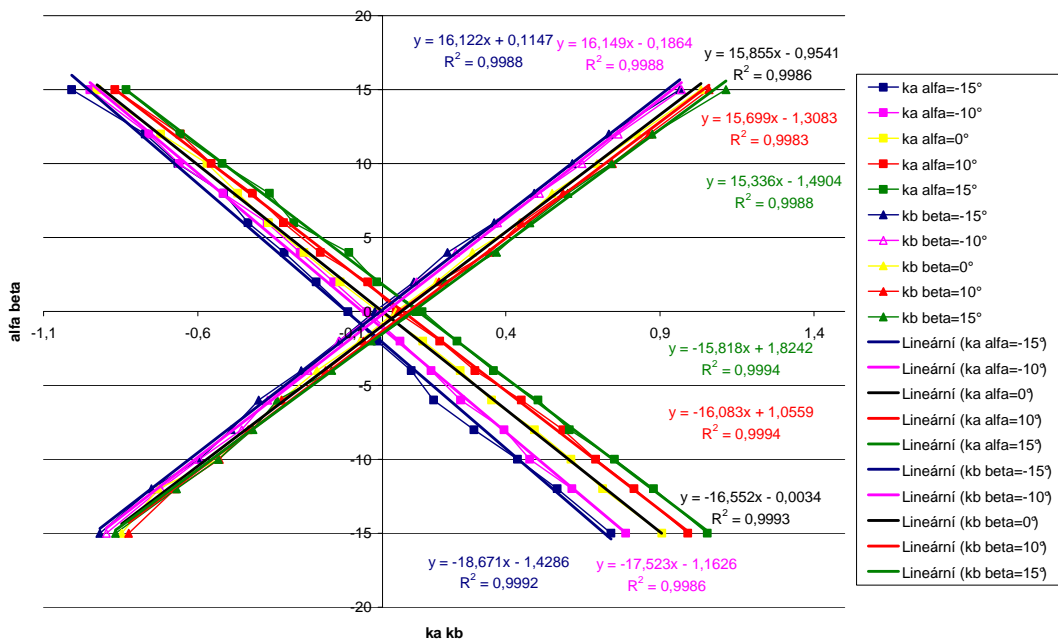
Polynomiální náhradu lze použít při předpokladu, že kalibrační data v předpokládaném rozsahu spojitá a nenastává pro danou rychlost skoková změna. Pokud je tento předpoklad splněn, kalibrační matice, která je v grafické formě reprezentována např. kalibrační charakteristikou (obr 5, 6), je velmi vhodná pro určení hodnot konstant polynomů. Na příkladu kalibrační matice z tabulky 1 lze ukázat, že lze vybrat sloupec hodnot κ_{α} kterým odpovídá sloupec α . Tyto hodnoty můžeme proložit polynomem a jeho koeficienty určit fitováním metodou nejmenších čtverců, kdy s výhodou použijeme pseudoinverzní matici, o rozměrech řádu polynomu a počtu úhlů pro které byla kalibrace prováděna. K určení řádu polynomu je vhodné určit korelační koeficient mezi „vyhlazenými“ a daty z kalibrační matice. Změnou koeficientu korelace pak lze určit, kdy ještě má cenu zvyšovat řád polynomu a kdy již další zvýšení řádu polynomu nepřinese podstatné zlepšení interpolovaných dat. Při dostatečně přesné interpolaci je rozdíl mezi interpolovanými daty a daty naměřenými výrazně menší než nejistot měření tlakových snímačů.

Tento postup lze použít nejen na parametry κ_{α} a κ_{β} , ale i na parametry κ_{λ} , κ_0 , $c_{p\alpha}$, $c_{p\beta}$, c_{p0} , c_{pS} a c_{pd} . Pokud by byla nepřesnost mezi interpolovanými daty a daty v kalibrační matici příliš velká, je nutno data získávat interpolací v rámci nejbližších hodnot kalibrační matice nebo provést podrobnější kalibraci.

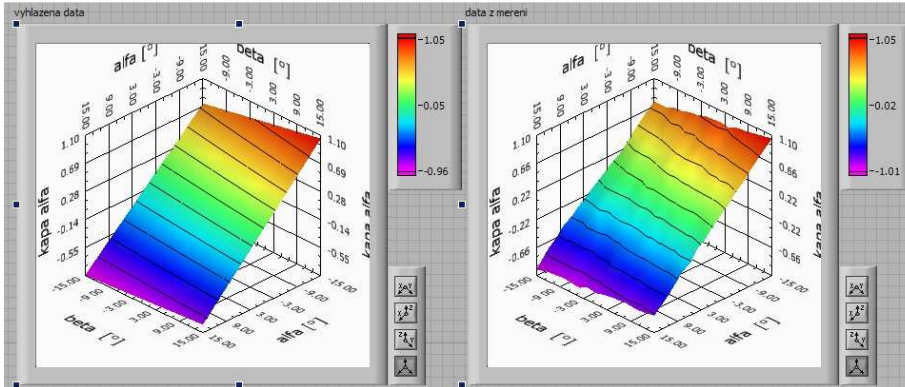
Při kalibraci pětivotrové sondy typu kobra byla naměřena kalibrační data. Tato data byla zpracována oběma výše zmíněnými postupy a následně byly takto vzniklé kalibrační matice proloženy výše zmíněným interpolačním postupem. Na obrázku 7 je možné vidět, jak vypadají naměřená data (vpravo) a jejich lineární náhrada (vlevo) pro součinitel κ_{α} , obrázek 8 vyobrazuje κ_{β} , obrázek 9 κ_{λ} a obrázek 10 κ_0 . Následují obrázky charakteristik pro $c_{p\alpha}$ (obrázek 11), $c_{p\beta}$ (obrázek 12), c_{pS} (obrázek 13), c_{pd} (obrázek 14) a c_{pc} (obrázek 15). Všechny tyto obrázky jsou pro rychlost proudu 15m/s.



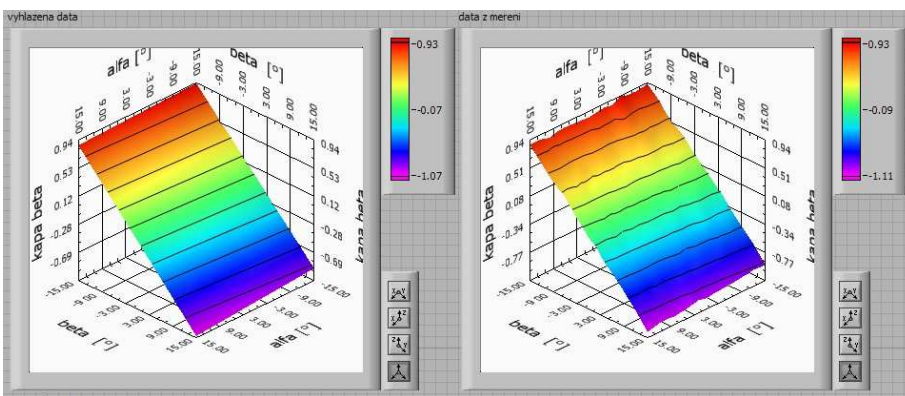
Obrázek 5, kalibrační charakteristika pětiotvorové směrové sondy typ kobra, závislost součinitelů κ_α κ_β (v obrázku ka, kb) vzhledem k úhlům náběhu α a vybočení β (v obrázku alfa, resp. beta) při rychlosti 10m/s



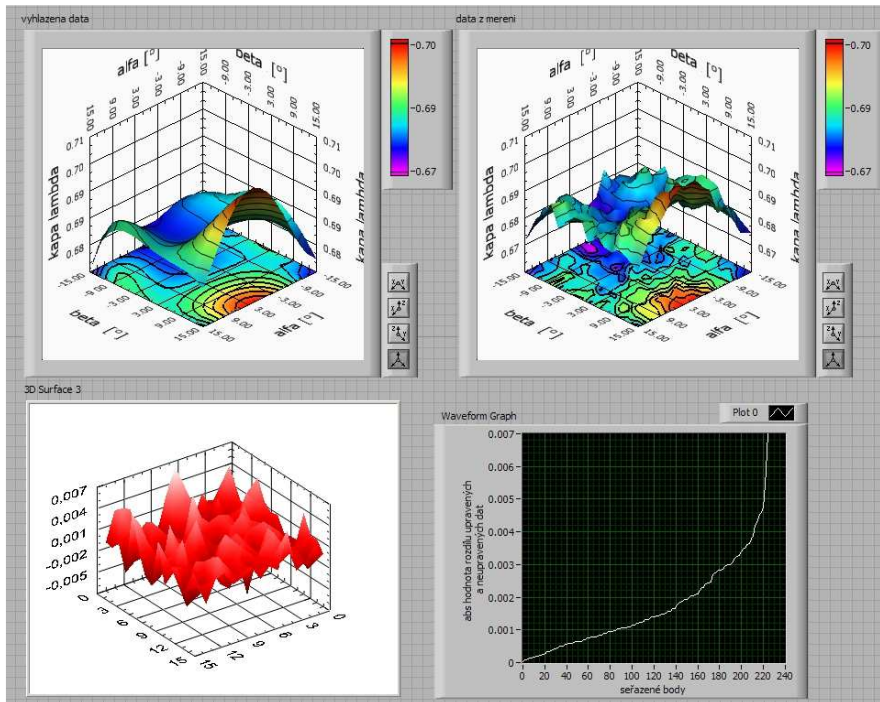
Obrázek 6, kalibrační charakteristika pětiotvorové směrové sondy typ kobra, závislost součinitelů κ_α κ_β (v obrázku ka, kb) vzhledem k úhlům náběhu α a vybočení β (v obrázku alfa, resp. beta) při rychlosti 15m/s



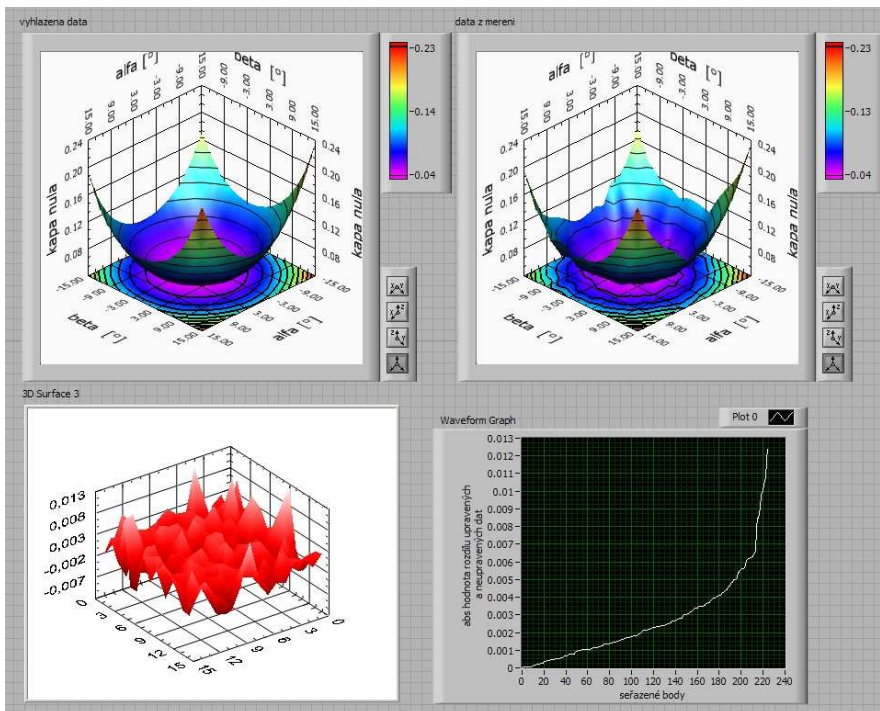
Obrázek 7, vlevo součinitel κ_α vyhlazený metodou nejmenších čtverců pro stupeň polynomu 1, vpravo naměřená data.



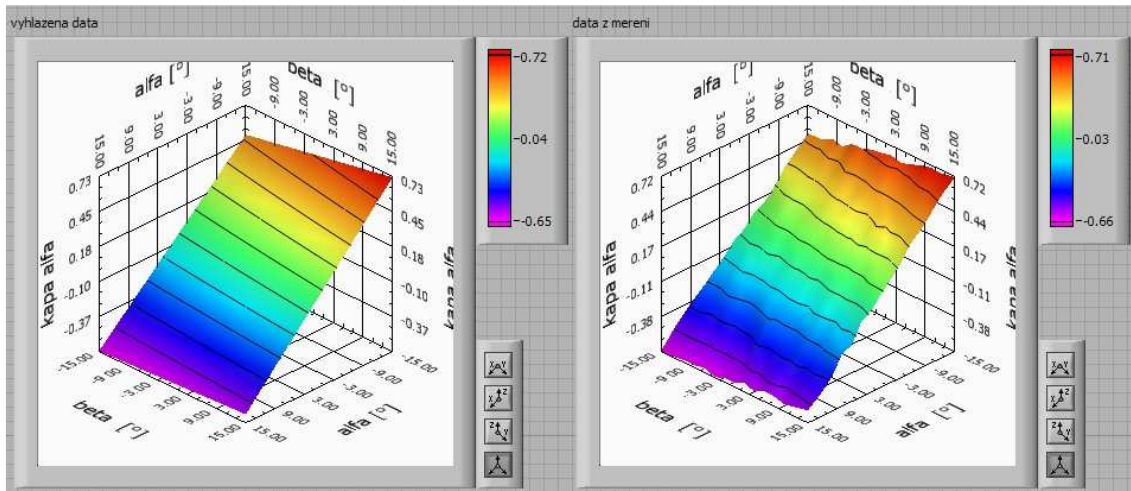
Obrázek 8, vlevo součinitel κ_β vyhlazený metodou nejmenších čtverců pro stupeň polynomu 1, vpravo naměřená data.



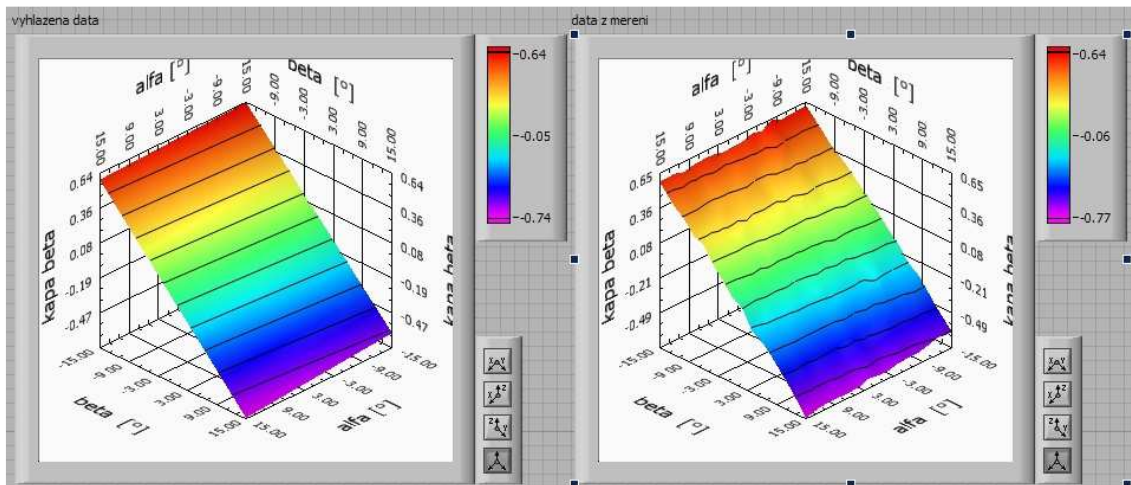
Obrázek 9, součinitel κ_λ vlevo nahoře po vyhlazení polynomy 4. stupně, vpravo nahoře naměřená data. Vlevo dole rozdíl mezi naměřenými a vyhlazenými daty, vpravo dole odchylky seřazené podle velikosti.



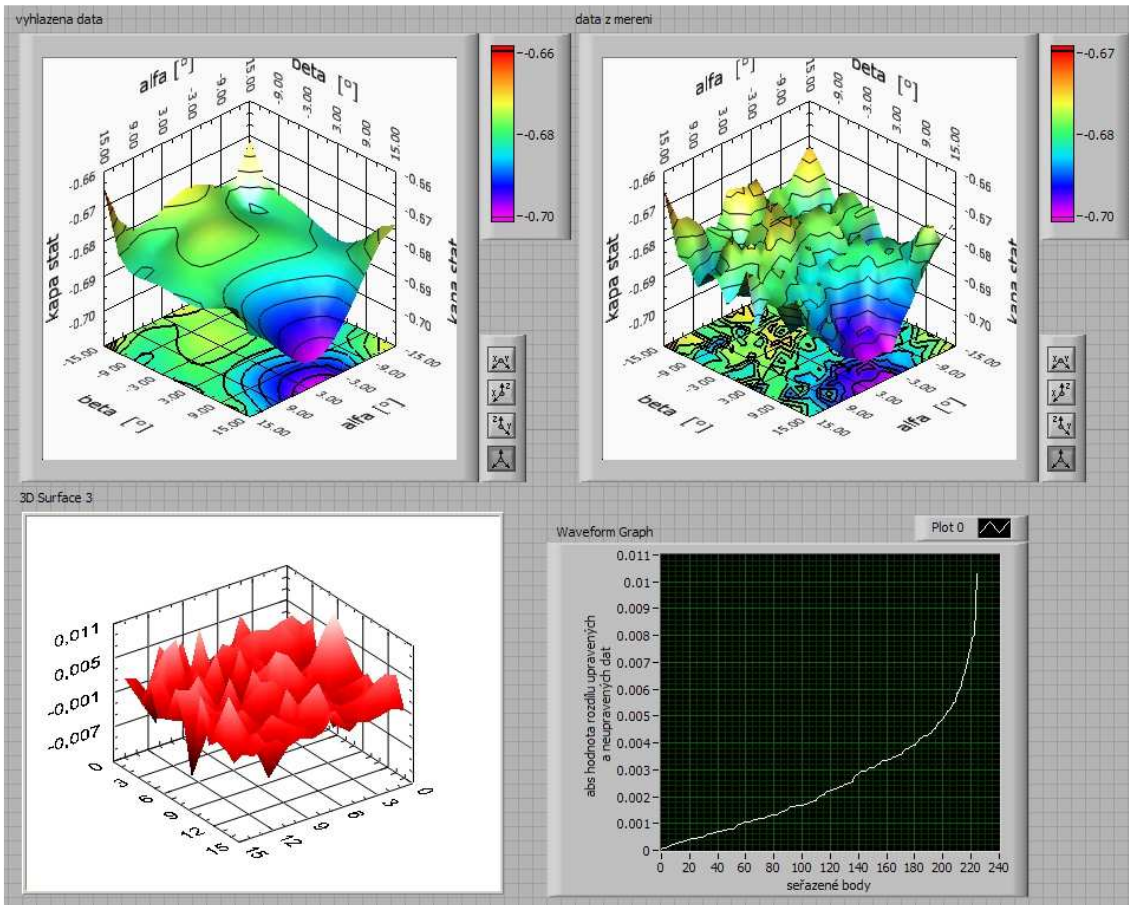
Obrázek 10, součinitel κ_0 vlevo nahoře po vyhlazení polynomy 4. stupně, vpravo nahoře naměřená data. Vlevo dole rozdíl mezi naměřenými a vyhlazenými daty, vpravo dole odchylky seřazené podle velikosti.



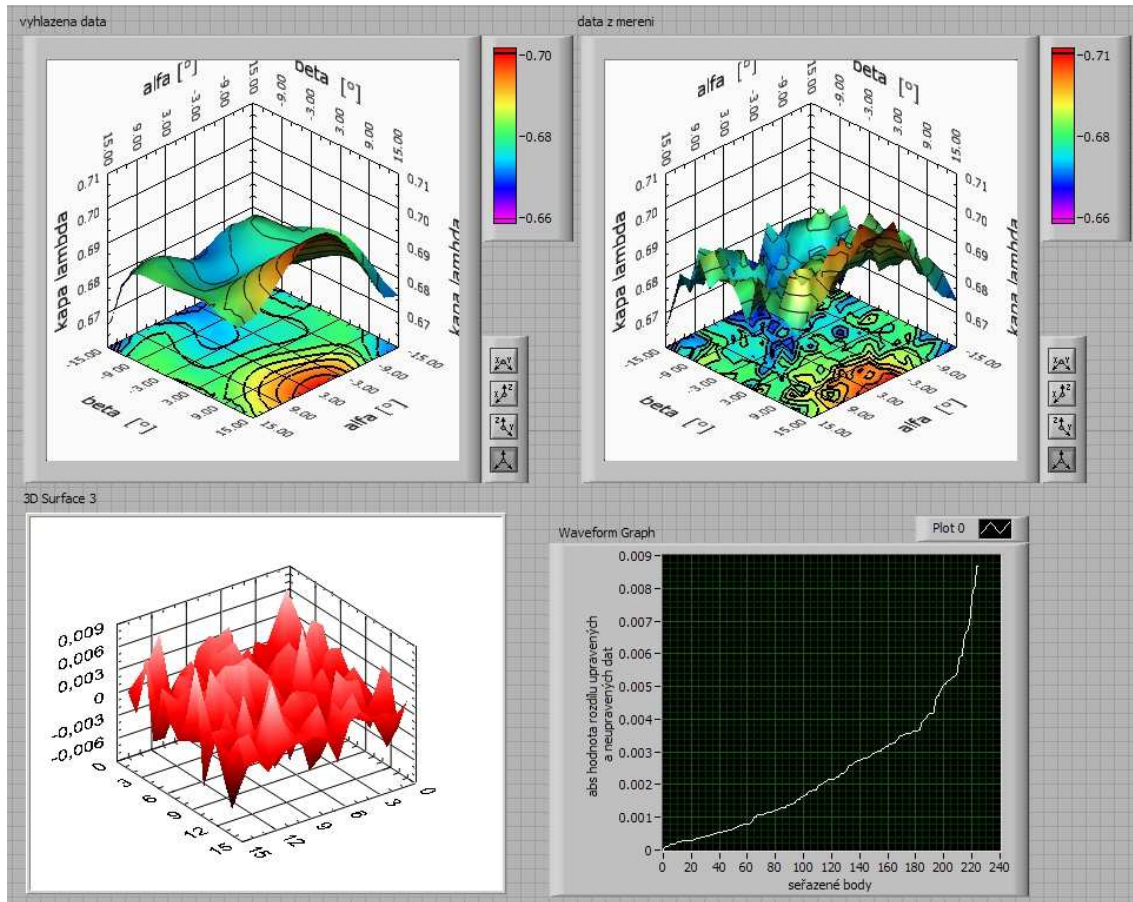
Obrázek 11, vlevo součinitel cp_α vyhlazený metodou nejmenších čtverců pro stupeň polynomu 1, vpravo naměřená data.



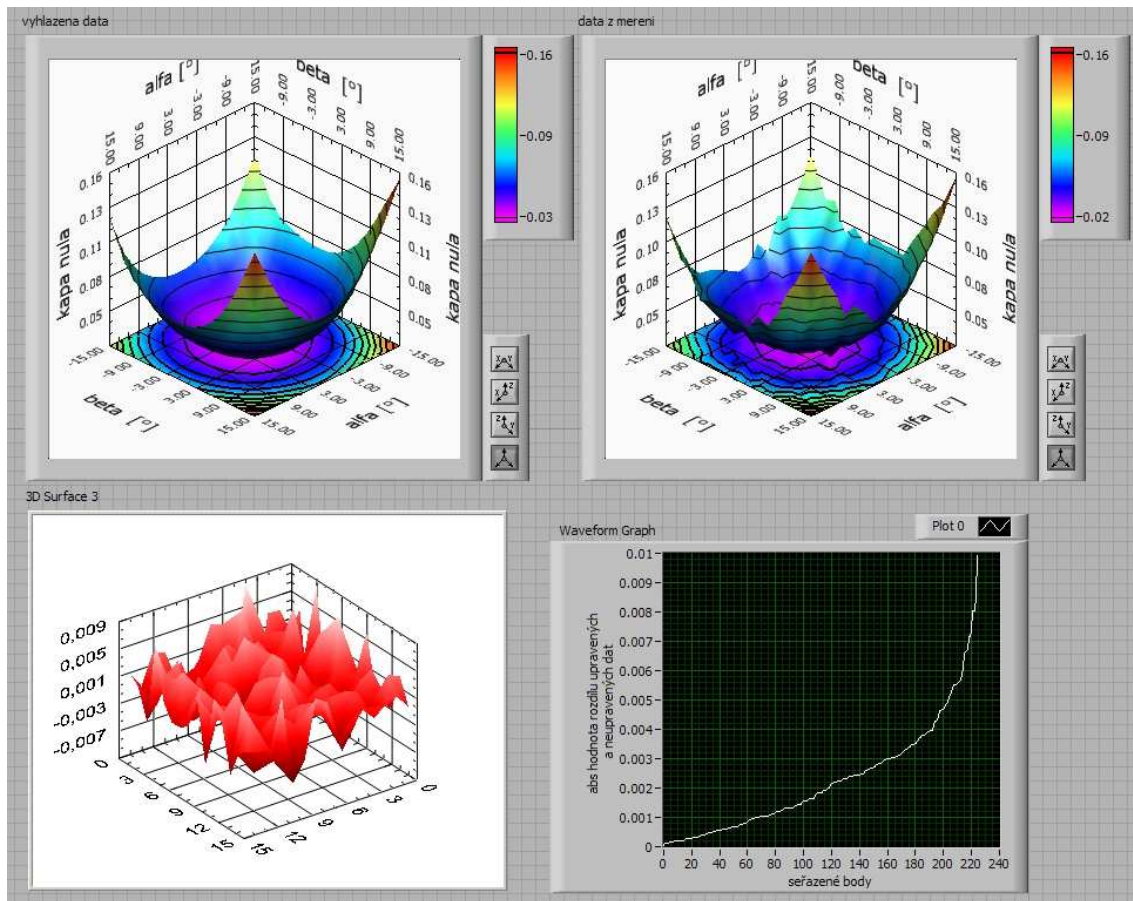
Obrázek 12, vlevo součinitel cp_β vyhlazený metodou nejmenších čtverců pro stupeň polynomu 1, vpravo naměřená data.



Obrázek 13, součinitel μ_s vlevo nahoře po vyhlazení polynomy 5. stupně, vpravo nahoře naměřená data. Vlevo dole rozdíl mezi naměřenými a vyhlazenými daty, vpravo dole odchylky seřazené podle velikosti.



Obrázek 14, součinitel $c_{p\lambda}$ vlevo nahoře po vyhlazení polynomy 5. stupně, vpravo nahoře naměřená data. Vlevo dole rozdíl mezi naměřenými a vyhlazenými daty, vpravo dole odchylky seřazené podle velikosti.



Obrázek 15, součinitel cp_0 vlevo nahoře po vyhlazení polynomy 4. stupně, vpravo nahoře naměřená data. Vlevo dole rozdíl mezi naměřenými a vyhlazenými daty, vpravo dole odchylky seřazené podle velikosti.

6. Závěr:

Na základě výše zmíněných charakteristik je možné usoudit, že metoda B (součinitele c_p) je velmi blízká metodě A, vyznačuje se jen o málo nižší citlivostí a při měření hodnot referenčního statického a celkového tlaku dává stejně dobré výsledky jako metoda A. Je vhodná pro měření v kalibrovaných měřících zařízeních typu aerodynamický tunel a navíc dává k dispozici charakteristiku statického tlaku v místě směrové sondy. Naproti tomu metoda A je vhodná pro neznámé prostředí, je zde však nutné dbát na velkou pečlivost při kalibraci. Případnou charakteristiku statického tlaku v místě sondy je možné použít z metodiky B při využití tlaků ze sondy:

$$\kappa_s = \frac{p_s - p_{ss}}{p_2 - p_{ss}} \quad (17)$$

Byla provedena kalibrace pětivotrové sondy typ kobra. Byly vytvořeny charakteristiky závislosti součinitelů κ_α a κ_β na úhlech α a β . Dále byla nastíněna kalibrační matice součinitele κ_α a byly vykresleny charakteristiky pro zjištění statického a celkového tlaku a velikost rychlosti. Byl ukázán způsob převodu naměřených dat za pomoci interpolace do analytických funkčních závislostí. Vzhledem k přesnosti a rozsahu použitých tlakových snímačů je absolutní chyba měření úhlu α a β $\pm 1^\circ$.

Prameny:

- [1] www.aeroprobe.com
- [2] Matějka, M.: Směrová kalibrace pětiotvorové kuželové sondy. In XXVI. Setkání kateder mechaniky tekutin a termodynamiky [CD-ROM]. Praha: Gradient, 2007, s. 59-63. ISBN 80-86786-09-9.
- [3] Kožíšek, Martin ; Šafařík, Pavel ; Luxa, Martin ; Šimurda, David. Cejchování kuželové pětiotvorové sondy pro vysokorychlostní aerodynamická měření. In Fluid Mechanics and Thermodynamics. Proceedings of Students' Work in the Year 2009/2010.. Praha : GRADIENT, 2010. S. 63-71. ISBN 80-86786-31-5.
- [4] Němec M. , Měření aerodynamických charakteristik pětiotvorové sondy, Zpráva AVR VZLU R-4249, Praha 2007
- [5] Benetka J. Měření tlakových směrových sond, Zpráva AVR VZLU Z-2886/84, Praha 1984
- [6] Rediniotis O. K. Allen R.D. Embedded-sensor multi-hole probes, United States Patent 7,010,970 B2 20006

Tabulka 1, kalibrační matice pětiotvorové sondy typ kobra pro rychlost 10m/s, součinitel κ_α

kapa alfa																
beta\alfa	-15°	-12°	-10°	-8°	-6°	-4°	-2°	0°	2°	4°	6°	8°	10°	12°	15°	
-15°	0,748	0,577	0,456	0,344	0,222	0,121	0,007	-0,071	-0,175	-0,273	-0,396	-0,497	-0,604	-0,719	-0,888	
-12°	0,776	0,630	0,540	0,356	0,275	0,133	0,035	-0,052	-0,166	-0,266	-0,371	-0,469	-0,579	-0,729	-0,908	
-10°	0,807	0,601	0,541	0,426	0,285	0,173	0,045	-0,088	-0,182	-0,276	-0,382	-0,522	-0,625	-0,711	-0,920	
-8°	0,826	0,670	0,549	0,432	0,297	0,200	0,087	-0,030	-0,127	-0,273	-0,373	-0,513	-0,623	-0,719	-0,886	
-6°	0,842	0,689	0,583	0,469	0,319	0,203	0,094	0,013	-0,101	-0,272	-0,355	-0,482	-0,611	-0,746	-0,916	
-4°	0,869	0,700	0,596	0,464	0,355	0,261	0,124	0,006	-0,170	-0,255	-0,402	-0,489	-0,650	-0,726	-0,910	
-2°	0,918	0,731	0,604	0,507	0,369	0,273	0,101	-0,005	-0,108	-0,251	-0,386	-0,498	-0,622	-0,686	-0,920	
0°	0,915	0,726	0,584	0,497	0,380	0,242	0,134	-0,007	-0,138	-0,250	-0,372	-0,512	-0,589	-0,668	-0,934	
2°	0,929	0,742	0,644	0,537	0,438	0,295	0,128	0,030	-0,105	-0,238	-0,337	-0,500	-0,592	-0,713	-0,907	
4°	0,894	0,764	0,609	0,516	0,383	0,277	0,160	-0,004	-0,107	-0,238	-0,347	-0,476	-0,610	-0,717	-0,866	
6°	0,976	0,809	0,694	0,584	0,413	0,312	0,175	0,056	-0,130	-0,203	-0,341	-0,462	-0,569	-0,658	-0,853	
8°	0,988	0,825	0,691	0,542	0,569	0,378	0,131	0,083	-0,034	-0,190	-0,299	-0,424	-0,583	-0,690	-0,857	
10°	1,003	0,792	0,687	0,581	0,495	0,307	0,194	0,065	-0,041	-0,155	-0,298	-0,410	-0,553	-0,704	-0,859	
12°	1,015	0,834	0,719	0,616	0,458	0,339	0,205	0,072	-0,015	-0,169	-0,250	-0,422	-0,563	-0,626	-0,836	
15°	1,055	0,877	0,744	0,623	0,448	0,381	0,235	0,068	-0,049	-0,154	-0,243	-0,361	-0,525	-0,640	-0,858	