

Optimalizovaná pětiovtvorová sonda

Ing. Vladislav Skála, Ing. Petr Pick

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Nožička, CSc .

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem, konstrukcí a stanovením charakteristik pětiovtvorové sondy pro měření směru a velikosti rychlosti proudu vzduchu v aerodynamickém tunelu. Sonda byla při návrhu optimalizována. Stanovené charakteristiky budou použity při vyhodnocování rychlosti měřených touto sondou.

Klíčová slova

Aerodynamika, měření rychlosti, pětiovtvorová sonda.

1. Úvod

Pro účely vyšetřování proudových polí za modely v měřicím prostoru automatizovaného aerodynamického tunelu bylo nutné navrhnout vhodnou pětiovtvorovou sondu. Pětiovtvorová sonda je jedním z typů směrových sond, používaných v experimentální aerodynamice.

Směrové sondy umožňují měřit rychlost a směr proudu nabíhající tekutiny, pokud tento směr není mimo oblast požadované směrové citlivosti sondy. Konstrukce směrové sondy se liší podle účelu, k jakému bude používána, a podle informací, které chceme o místě měření získat. Směrové sondy mohou být:

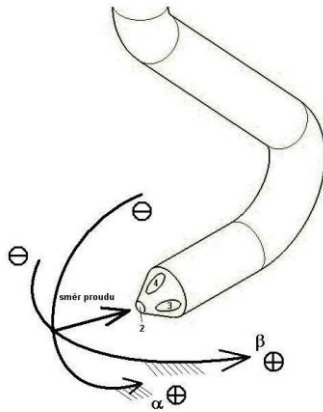
- dvouvtvorové (pro měření nabíhajícího proudu v jedné rovině)
- třívtvorové (pro měření v jedné rovině spolu s celkovým tlakem)
- čtyřvtvorové (pro měření ve dvou rovinách)
- pětiovtvorové (pro měření ve dvou rovinách s celkovým tlakem)
- sedmi-, dvanácti- i osmnáctiovtvorové (pro přesnější určení směru nabíhajícího proudu tekutiny ve dvou rovinách)

Zatímco pitot-statická sonda je citlivá v úhlu náběhu proudu 10° , pětiovtvorová sonda je limitována úhlem náběhu 55° a sedmiovtvorová sonda úhlem náběhu 75° . Pro vyšší úhly se využívají dvanácti a osmnáctiovtvorové sondy.

2. Pětivotvorová sonda

Konstrukční provedení těla pětivotvorové sondy bývá převážně trojí - přímé, do L a typ kobra.

Výhodou sondy typu kobra je, že při jejím natáčení zůstává zachován měřicí bod (pokud se natáčí sondou L, měřicí body při natáčení sondy podél osy těla tvoří kružnici). Sonda typu kobra je na obrázku 1.



Obr. č. 1 Pětivotvorová sonda typu „kobra“

Před vlastním měřením je nutno uvážit, jaké informace chceme z proudu tekutiny získat. 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 příliš dlouhých tlakových odběrech je totiž možné měřit pouze střední hodnoty rychlosti a průměrný směr nabíhajícího proudu. Pokud je však třeba znát časový proběh směru nabíhajícího proudu a jeho rychlost, lze využít sondy, které obsahují miniaturní tlakové snímače přímo uvnitř měřícího hrotu sondy (např. [6]. Tímto způsobem je možné měřit děje frekvencí až 20kHz.).

3. Optimalizovaná sonda

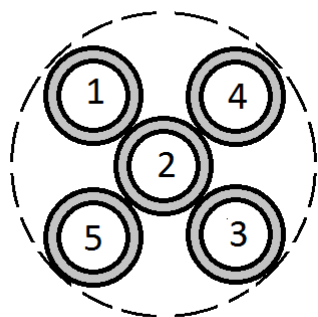
Návrh sondy byl optimalizován z hlediska minimalizace rozměrů čela sondy a maximalizace světlosti jednotlivých tlakových odběrů a tlakových vedení s přihlédnutím k technologickým možnostem pracoviště. Velikost sondy je obecně limitována velikostí vírů, resp. velikostí prostorových gradientů tlaku v proudu, zejména potom za modely, v aerodynamického tunelu. Potřeba dostatečné světlosti tlakových vedení sondy je svázána s velikostí výsledné časové konstanty měřícího řetězce tvořeného pětivotvorovou sondou, přívodními hadičkami a tlakovým snímačem (s pohyblivou, resp. deformovatelnou měřící membránou, tedy změnou objemu pracovní dutiny tlakového snímače). Pětivotvorová sonda bude při měřeních upnuta v traverzovací jednotce tunelu, která limituje maximální vnější průměr držáku sondy na hodnotu 6mm a také určuje minimální potřebnou délku tohoto držáku 455mm, viz br. č. 2. Držák sondy je dutý, držákem procházejí tlaková vedení. Sondou je možné natáčet okolo osy tohoto držáku. Měřicí hrot sondy se nachází na této ose otáčení. Z toho vyplývá tvar těla sondy, viz obr. č. 1. Tento tvar sondy bývá označován jako typ „kobra“.

Komerčně dostupné sondy jsou konstruovány jako svazek tenkých tenkostěnných trubiček z vhodného kovu, obvykle nerezové oceli popř. mosazi, viz obr. č. 2. První navržená

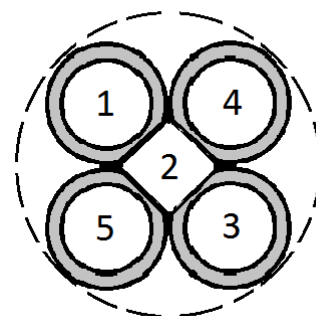
pětivotorová sonda byla klasická konstrukce, svazek pěti vytvarovaných tenkostěnných trubiček vsazených do dutého držáku sondy. Vlastní měřicí část sondy byla provedena spájením svazku trubiček pájkou a následně obrobena do přesného tvaru. Trubičky měly vnější průměr 1mm a světlost 0,5mm. Sonda byla před kalibrací otestována. Již při tomto testu se ukázalo, že měřicí řetězec, tvořený touto pětivotorovou sondou a tlakovými snímači s propojujícími hadičkami, vykazuje neúměrně dlouhou časovou konstantu ustálení měřených hodnot tlaků, se zřetelem na použití této sondy při automatizovaných měřeních. Použití takto tenkých trubiček na výrobu sondy se tedy ukázalo jako nevhodné. Jelikož bylo nutno čas potřebný k ustálení tlaku v měřicí dutině snímače radikálně zmenšit, bylo nutné zvětšit světlost jednotlivých tlakových vedení – zejména trubiček ve svazku, tvořícího sondu.

Na základě výše popsané zkušenosti byla hledána cesta, jak zmenšit časovou konstantu sondy. Svazek pěti trubiček je v kruhovém průřezu optimálně umístěn tak, že čtyři trubičky jsou umístěny „do čtverce“ a pátá trubička je umístěna uprostřed mezi těmito čtyřmi trubičkami. Takto jsou konstruovány komerčně dostupné pětivotorové sondy. Návrh sondy byl přepracován, byla navržena zvláštní úprava konstrukce pětivotorové sondy.

Konstrukční úprava spočívá ve vynechání prostřední trubičky. Je nahrazena kanálkem, který vznikne mezi čtveřicí k sobě přiléhajících „do čtvercového průřezu“ spájených trubiček. Takto vzniklý kanálek vykazuje menší plochu průřezu, než je světlost použitých trubiček (což vyplývá z jednotného poměru vnějšího průměru a světlosti vyráběných trubiček). Z tohoto důvodu bylo navrženo ztenčení stěn trubiček v místě kanálku. Viz obr. č. 3



Obr. č. 2 Klasická konstrukce sondy, řez



Obr. č. 3 Upravená konstrukce sondy, řez

Bylo nutné stanovit a prakticky ověřit vhodný výrobní postup takto navržené sondy. Nejprve bylo nutné vytvarovat čtveřici trubiček ohýbáním v jednoduchém přípravku. Následovalo zhotovení podélných ztenčení stěn tvořících budoucí pátý kanálek. Poté následovalo spájení trubiček do svazku. Svazek byl vsazen do trubky tvořící držák. Vlastní tělo sondy bylo zabroušeno do přesného tvaru včetně čelních měřicích fazetek - tlakových odběrů na měřicím hrotu sondy.

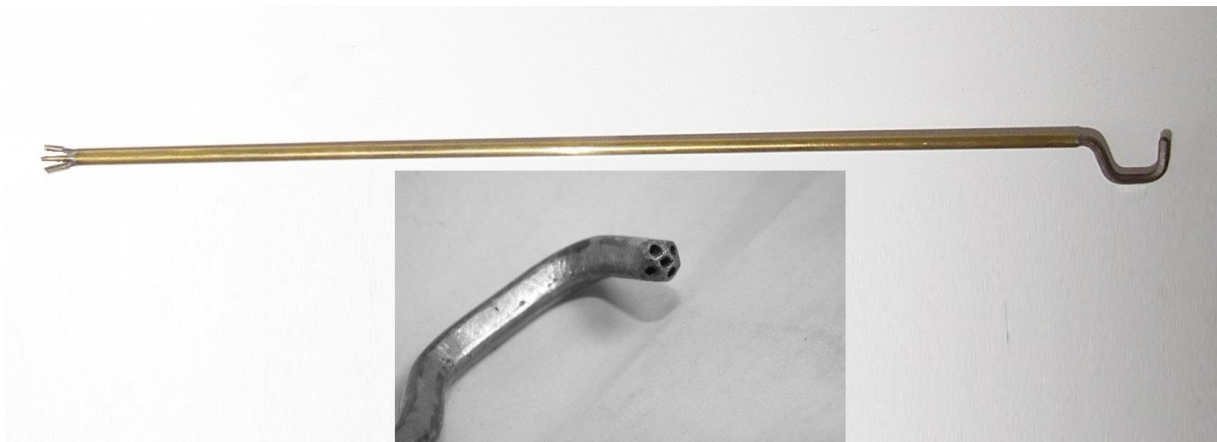
Protilehlé konce trubiček svazku byly vyhnuty ve směru od osy držáku a konce byly dále opatřeny zesílením pro navlečení přírodních hadiček k tlakovým převodníkům. Ke vzniklému vyústění prostředního kanálku byla v místě vyhnutí připájena krátká trubička, která umožňuje připojení hadičky k tomuto kanálku.

Takto navržená konstrukce sondy představuje optimum z hlediska světlosti jednotlivých tlakových vedení v sondě resp. v jejím držáku. Značnou nevýhodou je vysoká náročnost výroby sondy, zejména jednotlivé ohýbání trubiček, podélná ztenčení stěn trubiček v místě

středního kanálku a zejména pájení představuje z technologického hlediska poměrně náročné operace. Zejména při pájení je třeba dbát dodržení perfektní kvality a čistoty provedení pájených spojů z důvodu těsnosti a dobré průchodnosti středního kanálku. Celý technologický postup byl ověřen na několika vzorcích. Byly zhotoveny přípravky pro fixaci polohy jednotlivých trubiček při pájecích operacích. Byly stanoveny vhodné teploty pájky a vybráno nejvhodnější tavidlo.

3. Kalibrace optimalizované pětiotvorové sondy

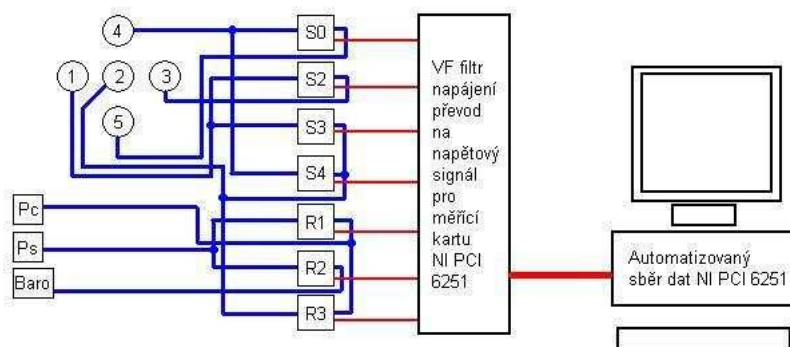
Po důkladné kontrole těsnosti a průchodnosti vyrobené pětiotvorové sondy, viz obr. č. 4, bylo přistoupeno ke kalibraci, tedy stanovení potřebných závislostí, které budou později sloužit k vyhodnocování směru a velikosti rychlosti proudění na základě měření pěti tlaků na sondě. Přesný postup kalibrace i vyhodnocení, viz např. V tomto příspěvku se omezíme na uvedení výsledků kalibračního měření.



Obr. č. 4 Optimalizovaná pětiotvorová sonda a detail měřícího hrotu sondy

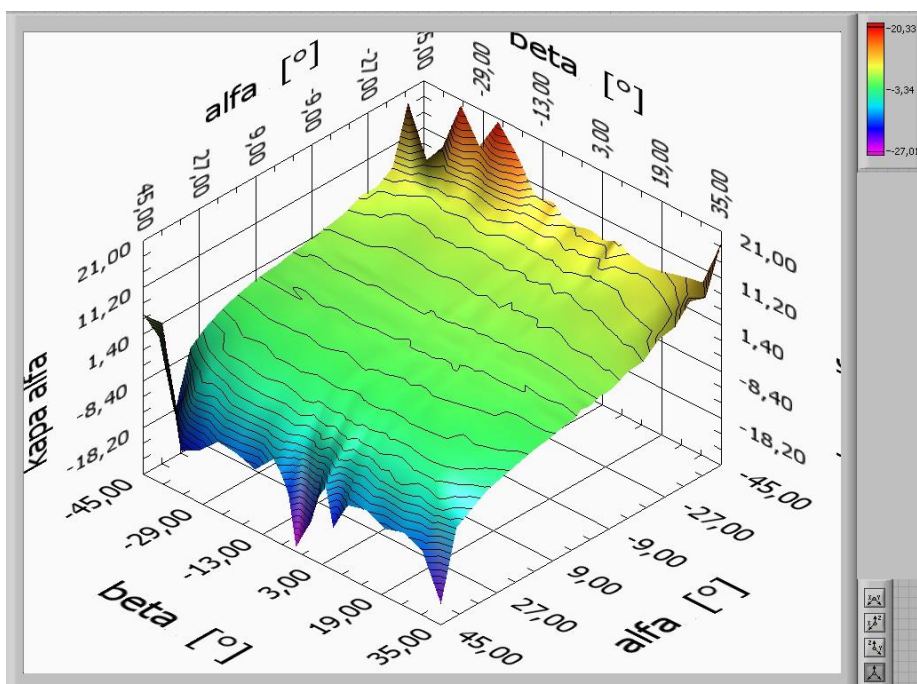
Kalibrace pětiotvorové sondy byla provedena na aerodynamické trati v laboratořích Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky Fakulty strojní, ČVUT. Aerodynamická trať byla pro kalibraci sondy vybavena kalibračním přípravkem umožňujícím natáčení sondy ve dvou na sebe kolmých osách. Kalibrace byla prováděna při rychlosti 10m/s.

Pro kalibraci byly použity tlakové snímače Rosemount kalibrové v rozsahu 0 - 500Pa a ± 600 Pa a snímačů Setra 265 kalibrovaných rozsahu ± 125 Pa. Pro měření byla využita měřící karta National Instruments PCI 6251 a programy vytvořené v programovém prostředí LabView 10.0 pro automatizovaný sběr a vyhodnocení dat, viz obr. č 4.

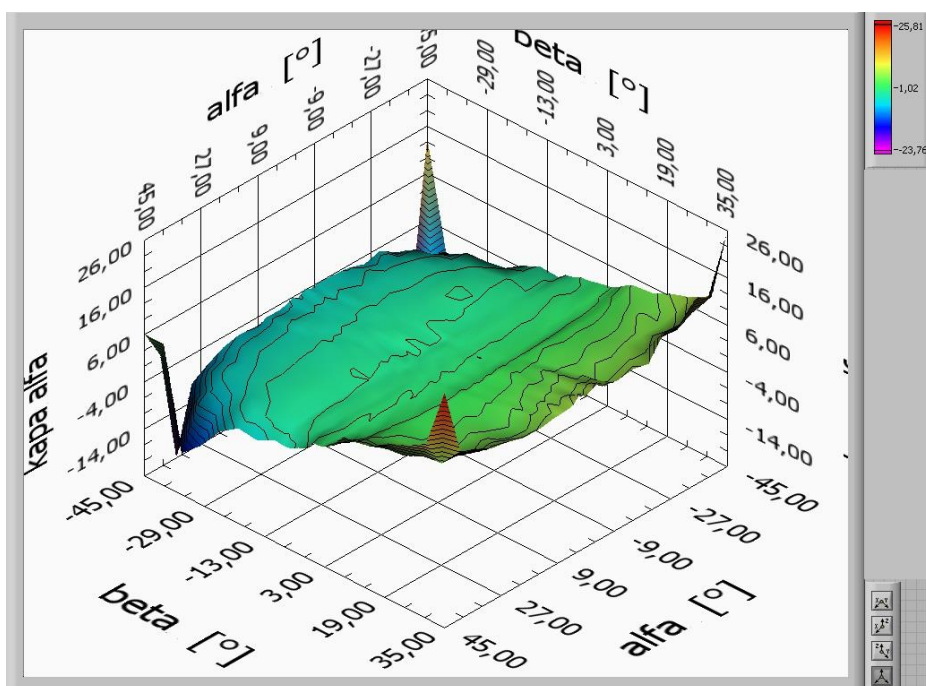


Obr. č. 5 Schéma zapojení kalibračního měření

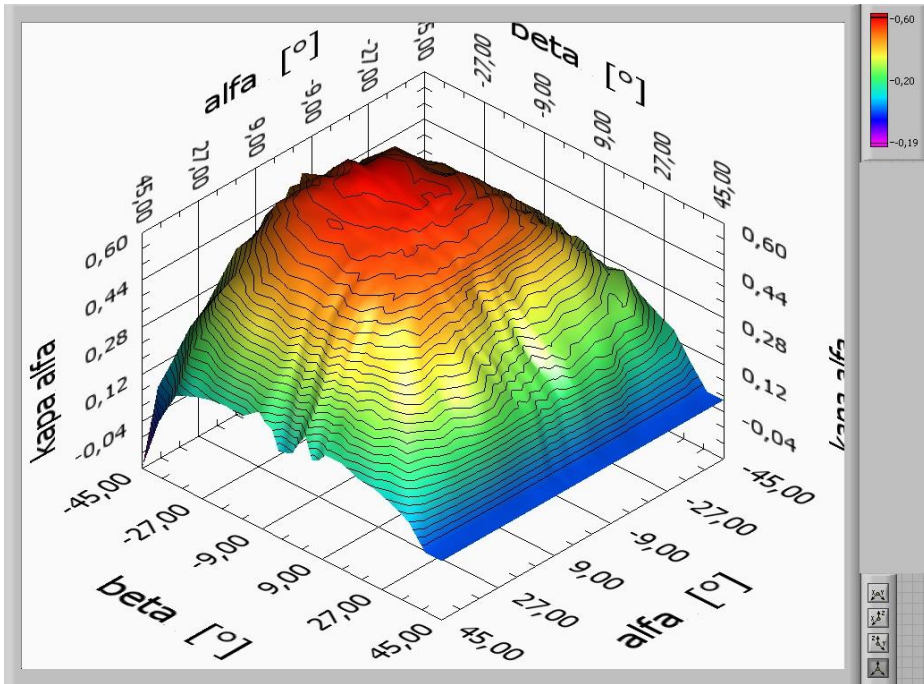
Výsledné závislosti jsou uvedeny v grafické podobě na obr. č. 6 až 9. Pro kalibraci sondy byla použita metodika British Standards (zpracována podle [2]). Kalibrace byla prováděna pro rychlost 10m/s. Během kalibrace byla ověřena dostatečně krátká (tj. kratší než cca 2 sekundy) celého časová konstanta měřícího systému s touto pětiovtorovou sondou.



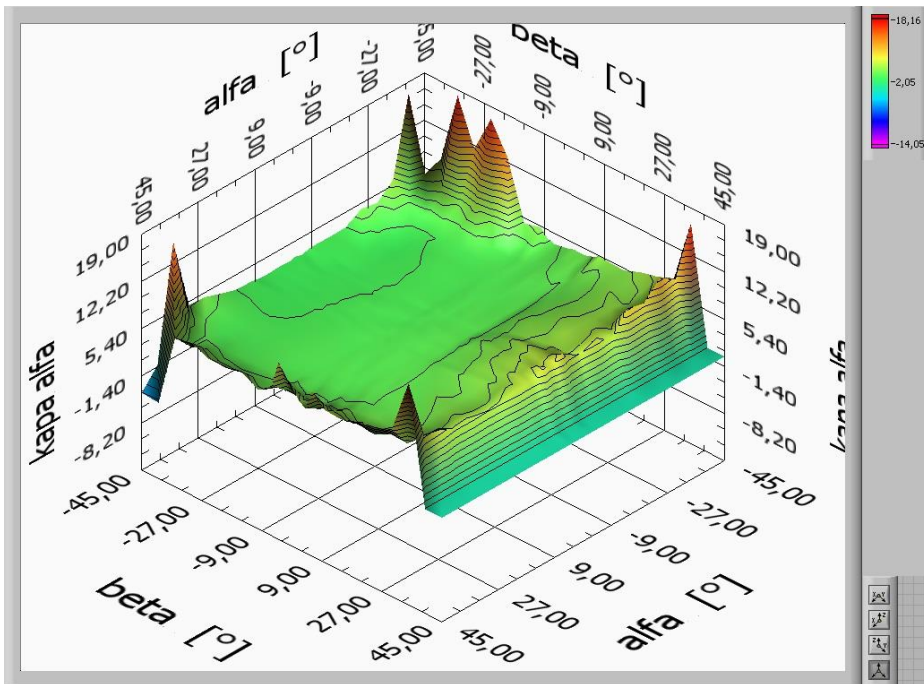
Obr. č. 6 Součinitel alfa, viz např. [7]



Obr. č. 7 Součinitel beta, viz např. [7]



Obr. č. 8 Součinitel lambda, viz např. [7]



Obr. č. 9 Celkový tlak, viz např. [7]

4. Závěr

Byla navržena technologicko konstrukční úprava pětiovorové sondy s cílem optimalizovat její vlastnosti. Takto navržená konstrukce sondy byla prakticky ověřena a pro účely měření rychlosti touto sondou byla provedena její kalibrace.

Použité označení

1,3,4,5 – boční tlakový odběr sondy

2 – tlakový odběr sondy – celkový tlak

Seznam použité literatury

[1] www.aeroprobe.com

[2] Matějka M., Směrová kalibrace pětiovorové kuželové sondy, ČVUT 2007

[3] Kožíšek, Martin; Šafařík, Pavel; Luxa, Martin; Šimurda, David. Cejchování kuželové pětiovorové sondy pro vysokorychlostní aerodynamická měření. In Fluid Mechanics and Thermodynamics. Proceedings of Students' Work in Year 2009/2010. Praha: GRADIENT, 2010. S. 63-71. ISBN 80-86786-31-5.

[4] Němec M., Měření aerodynamických charakteristik pětiovorové 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

[7] Pick, P. Calibration of Fivehole Probe and Calibration Data Processing In: Colloquium FLUID DYNAMICS 2011 Proceedings. Praha: Ústav termomechaniky AV ČR, 2011, p. 29-30. ISBN 978-80-87012-36-9.