



INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2005

NÁRODNÍ KONFERENCE

s mezinárodní účastí

Svratka, Česká republika, 9. - 12. května 2005

PRELIMINARY AEROELASTIC EXPERIMENTS ON THE PROFILE WITH TWO DEGREES OF FREEDOM

V.Vlček, M.Luxa*

Summary: *Experimental equipment for simultaneous dynamic and optical measurements on a vibrating profile with two degrees of freedom was designed and realized. One degree of freedom is represented by translational movement across the flow field, the second degree of freedom by rotation around profile axis, which is in the 1/3 from the leading edge. The schlieren and interferometric methods were used for flow visualization, images were recorded by a photo-camera. The system triggering, the flash and camera shutter are controlled according to the position of the profil using a LabViews programme. Examples of the interferogrammes obtained are presented.*

1. Úvod

Příspěvek byl vypracován v rámci projektu TANDEM Ministerstva průmyslu a obchodu ČR: FT-TA/026 č. OV6040061 část T13 "Výzkum a vývoj analytických a experimentálních metod vyšetřování dynamických a aeroelastických vlastností letadlových konstrukcí", řešeného v Ústavu termomechaniky AV ČR (ÚT AV ČR) ve spolupráci s Výzkumným a zkušebním leteckým ústavem a.s. (VZLU) Praha – Letňany.

Jedním z dílčích cílů tohoto projektu je vývoj metodiky optických měření nestacionárních proudových polí kolem kmitajícího profilu obtékaného vzduchem v aerodynamickém tunelu. Hlavním problémem je synchronizace dynamických, pneumatických a optických měření s jednotlivými fázemi kmitu profilu tak, aby byla získána informace o aeroelastických a aerodynamických charakteristikách profilu v předem definovatelných okamžicích během jedné periody kmitu. Jde zejména o vyšetření případů blízkých ke vzniku vzniku dynamické nestability systému, tj. flutteru, kdy profil kmitá s velkými výchylkami. Obě vlastní frekvence se s rostoucí rychlostí vzduchu k sobě postupně blíží a celkový útlum obou tvarů kmitání zpočátku roste díky dominantnímu aerodynamickému tlumení. V okolí kritické rychlosti flutteru, která byla pro torzní tyčku $\varphi=3$ mm blízká 120 m/s, se útlum prvního (převážně translačního) vlastního módu náhle prudce snížil k nulové hodnotě a systém se poté rozkmital

* Ing. Václav Vlček, CSc., Ing. Martin Luxa: Ústav termomechaniky AV ČR; Dolejškova 5; 182 00 Praha 8; tel.: +420.266 053 402, fax: +420.286 584 695; e-mail: vlcek@it.cas.cz

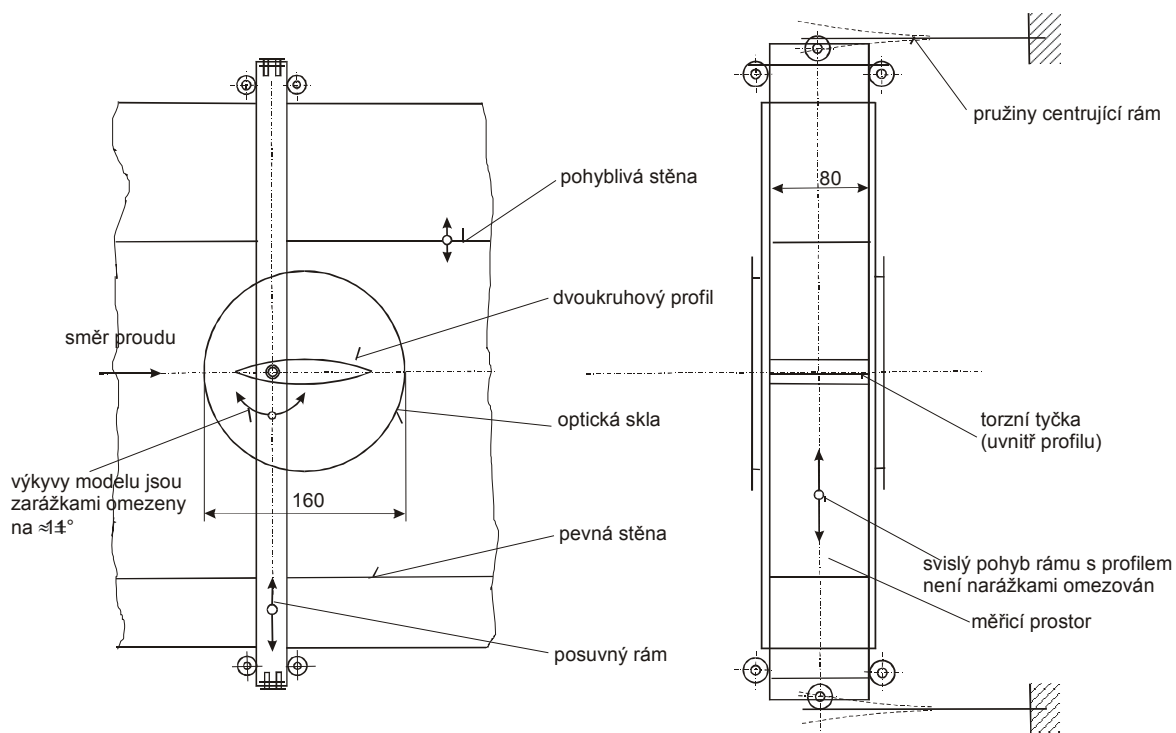
a systém se poté rozkmital samobuzeně s rychlým nárůstem amplitud. Systém je s rostoucí rychlostí nejprve aerodynamickými silami tlumen a až při rychlosti blízké ke kritické rychlosti flutteru dojde k strmému nárůstu úrovně vibrací.

V příspěvku jsou uvedeny některé výsledky, které byly získány s profilem, v němž byla použita torzní tyčka o průměru 3 mm; pro zlepšení reprodukovatelnosti měření byla pravidelnost kmitání v blízkosti flutteru zvyšována tím, že po zjištění flutteru byla stálost posuvné složky pohybu udržována působením vibrátoru.

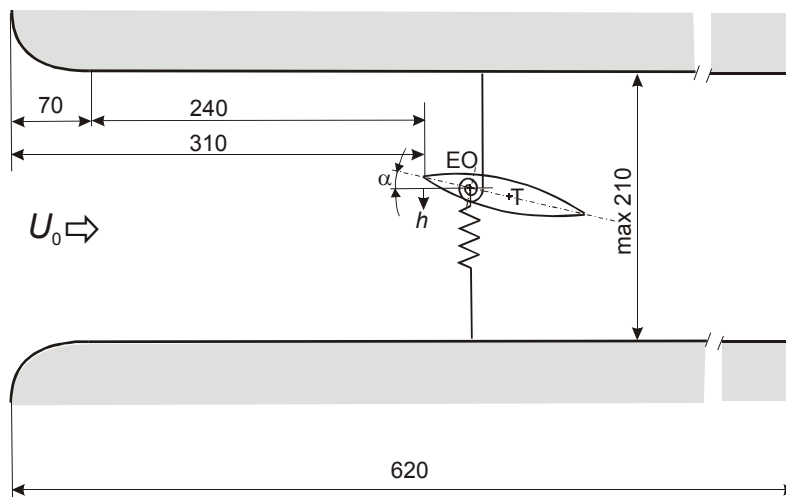
2. Popis aeroelastického modelu

Bylo navrženo experimentální zařízení umožňující současně dynamická i optická (např. interferometrická) měření na profilu kmitajícím se dvěma stupni volnosti při proměnlivé vzdálenosti horní stěny aerodynamického tunelu od profilu. Konstrukce byla uzpůsobena pro použití v podtlakovém aerodynamickém tunelu.

Schema konstrukce aeroelastického modelu je na obr.1. Umístění profilu ve vstupní části měřicího prostoru aerodynamického tunelu je schematicky znázorněno na obr. 2. Použité konstrukční řešení umožňuje dvoukruhovému profilu rotační pohyb kolem elastické osy umístěné ve třetině jeho tělvisy a posuvný přímočarý pohyb ve směru kolmém k proudu vzduchu. Polohu elastické osy lze obrácením a současným posuvem svisle kmitajícího rámu ve směru proudu posunout do poloviny nebo dvou třetin tělvisy profilu a přitom zachovat umístění profilu v zorném poli měřicího prostoru



Obr.1. Schema zařízení pro studium nestacionárních 2D aeroelastických jevů



Obr.2. Umístění profilu v měřicím prostoru

Profil byl navržen především z výrobních důvodů jako dvoukruhový; symetrie profilu umožňuje měnit orientaci profilu vůči nabíhajícímu proudu tak, že osa rotace profilu je v přední nebo v zadní třetině tětivy – při této změně orientace profilu je třeba rozebrat a otočit i celý rám, na kterém je profil upevněn.

Profil je dutý, aby do něj bylo možno nainstalovat miniaturní snímače tlaku a zrychlení, a popřípadě i přídatnou hmotu, která by umožňovala měnit i polohu těžiště a tím i aeroelastické vlastnosti modelu. Profil je vyroben z duralu s délkou tětivy 120 mm a tloušťkou 21,6 mm, jeho celková hmotnost je 210 g, hmotnost pohybujícího se rámu s profilem je 1000 g. Profil je v jedné třetině tětivy uložen v kuličkových ložiscích a v rovině tětivy rozpůlen - tím je umožněn přístup ke snímačům tlaku a zrychlení. Na jedné straně profilu jsou dutým čepem vyvedeny z profilu kabely mimo měřicí prostor; na druhé straně profilu je vyvedena dutým čepem torzní tyčka volitelného průměru, která je pak pevně uchycena v rámu. Při největším použitém průměru tyčky 4 mm z pérové oceli je vlastní frekvence rotačního pohybu profilu 52 Hz. Uchycení torzní tyčky v rámu umožňuje v malém rozmezí spojitě nastavovat úhel náběhu profilu a umožňuje tak přesné nastavení nulového úhlu náběhu podle výsledků optických měření.

Základní dynamické vlastnosti aeroelastického modelu jako systému se dvěma stupni volnosti (posuv a rotace) byly ověřeny v dynamické laboratoři ÚT AV ČR, výsledky jsou uvedeny v příspěvku Horáček J., Kozánek J., Veselý J. (1985). Vlastní frekvence posuvného kmitání za klidu byla 18 Hz a vlastní frekvence torzního kmitání za klidu:

torzní tyčka ϕ 1,7 mm, vlastní frekvence $f_0 = 12,4$ Hz,

torzní tyčka ϕ 3,0 mm, vlastní frekvence $f_0 = 35,1$ Hz,

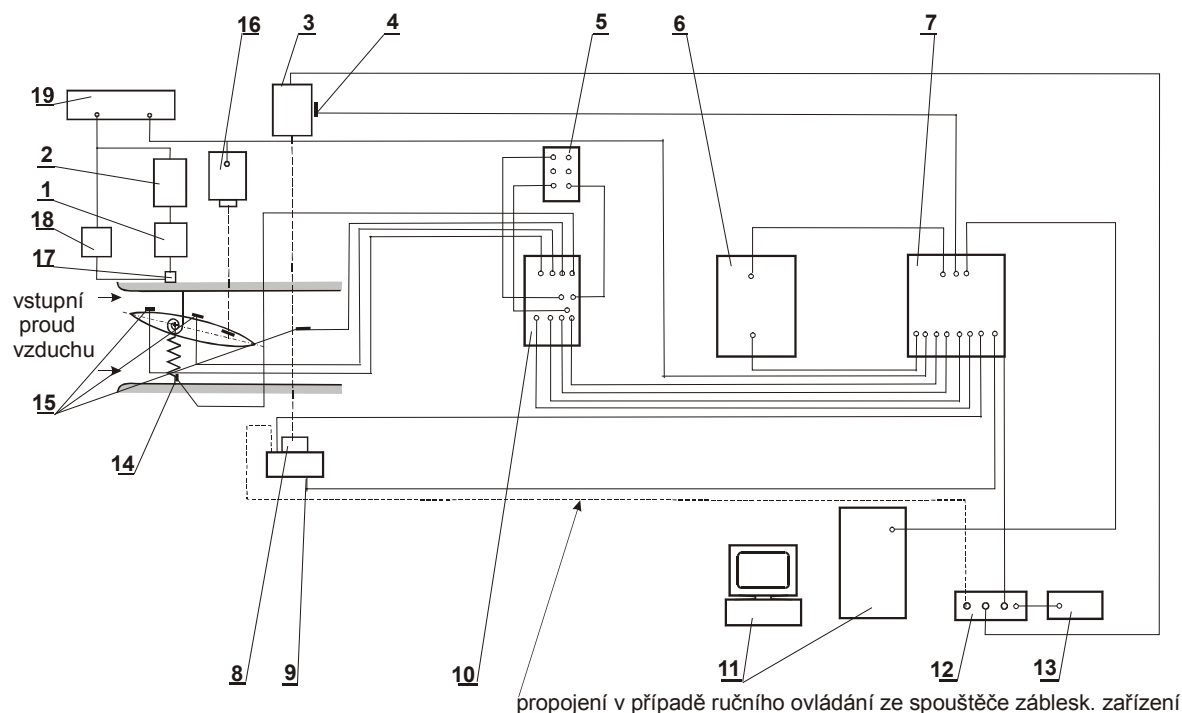
torzní tyčka ϕ 4,0 mm, vlastní frekvence $f_0 = 54,4$ Hz.

3. Popis optického a synchronizačního zařízení a metodika měření

Až na výjimky, např. Matas R., Vlček V. (2003), byla v ÚT opticky proměřována proudová pole v okolí nepohybujících se pevných povrchů. Měření proudových polí v okolí kmitajících těles vyžadovalo úpravu stávajícího měřicího zařízení i metodiky měření. Podrobněji je tato problematika popsána v Horáček et al. (2004) a Vlček et al. (2004).

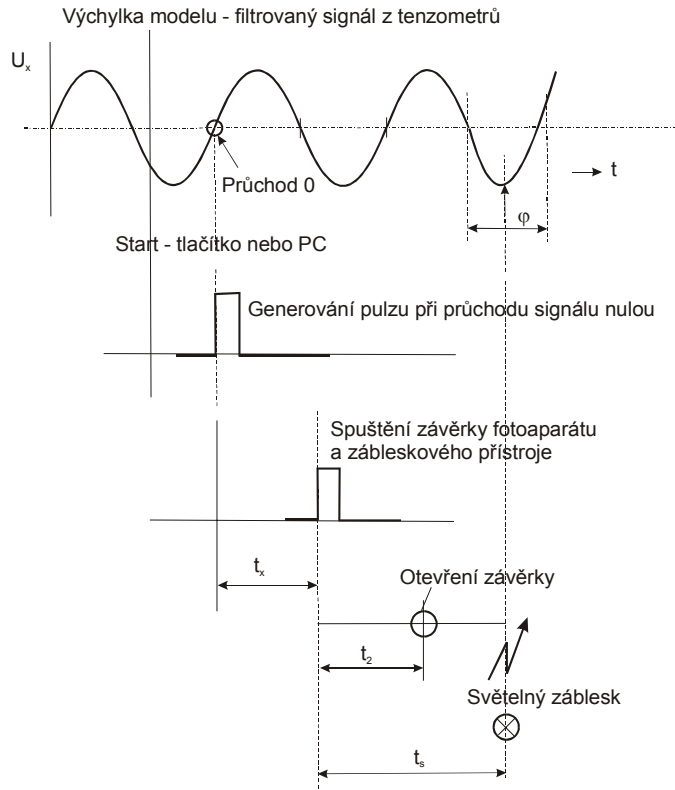
Schema měřicího zařízení pro zviditelnění proudového pole kolem kmitajícího profilu je uvedeno na obr. 3. Profil byl při určité konstantní rychlosti proudění a po identifikaci vlastních frekvencí rozkmitáván elektrodynamickým vibrátorem 1 napájeným sinusovým signálem z generátoru 2 v rezonanci buď převážně posuvného nebo převážně rotačního pohybu. Dynamická odezva systému byla snímána laserovým vibrometrem 16 a tenzometrem 14 nalepeným na listové pružině a snímajícím tak translační pohyb profilu. Signály z tenzometru a z laserového snímače vibrací jsou vedeny do karty National Instruments v řídicím PC. Do této karty jsou zároveň přivedeny signály tlakových snímačů (Kulite) 15 zabudovaných přímo v oscilujícím profilu i ze snímače celkového tlaku umístěným za profilem. Synchronizace zábleskového zařízení pro osvit proudového pole kolem kmitajícího profilu i otevření a uzavření závěrky digitálního fotoaparátu 8 s pohybem profilu je řízeno počítačem, který průběžně vyhodnocuje periodu kmitů z průchodů signálu nulovou hodnotou. Synchronizace měření a spouštění jiskřičky 12 i ovládání závěrky fotoaparátu je realizováno v softwarovém prostředí LabView. Za předpokladu, že jsou oscilace profilu periodické, lze periodu kmitání rozdělit na N požadovaných časových okamžiků, ve kterých lze postupně pořídit snímky kmitajícího profilu i proudového pole.

Výchylka modelu se snímá nosníkovým deformačním členem s křemíkovými tenzometry v polomůstkovém zapojení, což ve spojení s elektronickou částí umožňuje statickou kalibraci převodu výchylek na výstupní napětí. Pásmovým aktivním filtrem ve frekvenčním intervalu $f \in \langle 5; 70 \rangle$ Hz se získá harmonický signál a z něj se odvodí měřitelný časový údaj pro nastavení okamžiku spuštění jednotlivých přístrojů - viz časový diagram na obr. 4. Jako vztažný bod je volen průchod nulou při pohybu profilu vzhůru (proti působení gravitace).



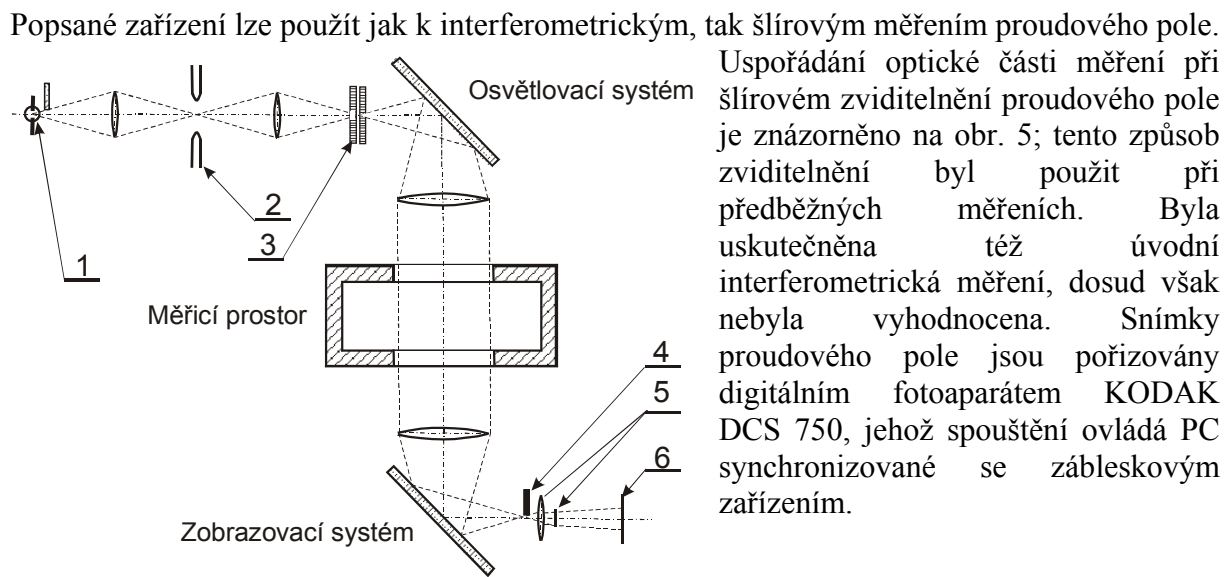
- 1 - vibrátor, 2 - generátor sinusových kmitů, 3 - zábleskový přístroj, 4 - feritová anténa, 5 - zdroj ss proudu pro zesilovač ($\pm 15V$), 6 - synchronizační zařízení, 7 - svorkovnice k měřicí kartě PC, 8 - fotoaparát, 9 ovládání závěrky fotoaparátu, 10 - zesilovač ss a střídavých složek signálu, 11 - PC, 12 - spouštěč zábleskového zařízení, 13 - napájecí zdroj, 14 - tenzometr, 15 - snímače tlaku, 16 - laserový 17 - snímač síly, 18 - zesilovač, 19 - analyzátor, 20 - zesilovač

Obr.3 Schema měřicího zařízení pro zviditelnění proudového pole kolem kmitajícího profilu



t_x - časové zpoždění el. impulsu pro nastavení světelného záblesku ve fázi kmitu modelu $\varphi \in \langle 0; 360^\circ \rangle$
 t_2 - čas potřebný pro otevření závěrky
 t_s - časové zpoždění světelného záblesku od okamžiku spuštění (časové konstanty spouštěcích obvodů zábleskového přístroje)

Obr.4 Časový sled spouštěcích impulsů a světelného záblesku



1- rtuťová výbojka, 2 -jiskrový generátor, 3 - šlírová štěrbina, 4 - šlírový nůž, 5 - objektiv, 6 - snímací zařízení

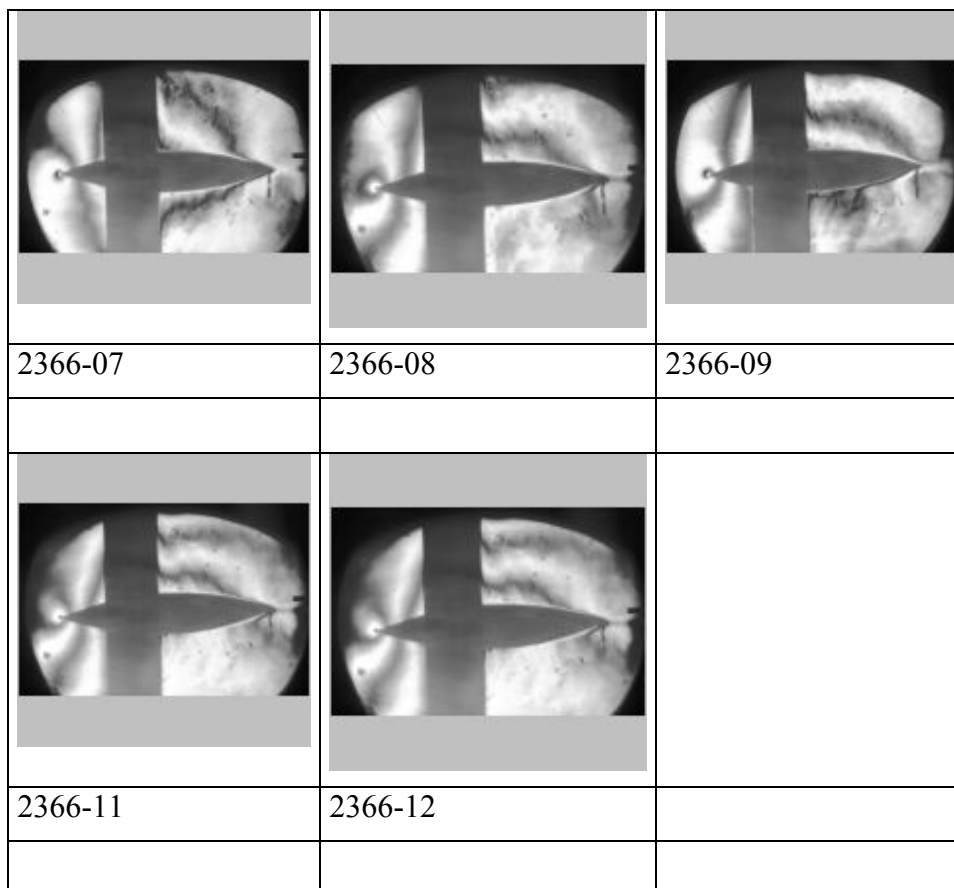
Uspořádání optické části měření při šířovém zviditelnění proudového pole je znázorněno na obr. 5; tento způsob zviditelnění byl použit při předběžných měřeních. Byla uskutečněna též úvodní interferometrická měření, dosud však nebyla vyhodnocena. Snímky proudového pole jsou pořizovány digitálním fotoaparátem KODAK DCS 750, jehož spuštění ovládá PC synchronizované se zábleskovým zařízením.

Obr.5 Schema optického měření

4. Některé předběžné výsledky optických měření

4.1 Příklady interferogramů

Ukázka interferogramů získaných při měření proudového pole v okolí profilu při rychlostech blízkých flutteru je na obr.6; byla použita torzní tyčka o průměru 3 mm.



obr. 6 Interferogramy proudových polí při rychlostech blízkých hranici flutteru
($\phi=0$, $w=105$ m/s)

4.2 Výsledky ověřování reprodukovatelnosti měření pro zvolenou fázi posuvného pohybu

Pro ověření reprodukovatelnosti měření byla uskutečněna řada měření v první půlperiodě zdvihu při fázovém posuvu zdvihu $\phi = 0, \pi/2$ a π . Některá z nich jsou uvedena na obr.6. Průběh zdvihu byl při všech měřeních sinusový, což zajišťoval připojený, dostatečně výkonný vibrátor. Při měřeních byl na počítači průběžně sledován a registrován průběh zdvihu, okamžik záblesku a okamžiky otevření a zavření závěrky fotoaparátu; přitom jednotlivá měření v každé skupině měření byla uskutečněna v co nejkratších časových intervalech po sobě a při nepřerušném chodu aerodynamického tunelu. Na uvedeném výběru obrázků je přesto vidět u některých výsledků téže skupiny měření poměrně značný rozdíl mezi polohami čar stejné hustoty (tj. mezi průběhy interferenčních proužků). Lze usuzovat, že zjištěné

odlišnosti proudových polí jsou spojeny zejména s nepravidelnostmi rotačního pohybu profilu, způsobenými např. poruchami ve vnějším proudě, přirozenou turbulencí nebo mechanickými vředy.

Z interferogramů je možno odečíst fázový posuv mezi posuvným a rotačním pohybem profilu. Při průchodu kmitajícího profilu výchozím klidovým stavem ve směru kladného zdvihu (nahoru), měl všech měřených případech profil kladný úhel náběhu blízký $4,5^{\circ}$, při průchodu touto polohou směrem dolů byl úhel náběhu přibližně $-4,5^{\circ}$. Úhel náběhu v horní úvratí posuvného pohybu se měnil v rozmezí $0^{\circ} - 5^{\circ}$ v závislosti na rychlosti nabíhajícího proudě. Uvedené úhly byly získány zprůměrováním hodnot při vyřazení několika případů, které byly výrazně odlišné. Přitom ale bylo zjištěno, že v případě $\phi = \pi$ byla shoda proudových polí výrazně vyšší než v případě $\phi = 0$, což by mohlo ukazovat na vliv mechanických vlastností modelu.

Zatím nejsou známy příčiny zjištěných nepravidelností v proudovém poli, ale mohou být způsobeny jak účinky poruch vznikajících v proudovém poli, tak poruchami vázanými na mechanické vlastnosti zařízení. Při měření dynamických vlastností modelu v klidném prostředí v laboratoři dynamiky pevných těles bylo silové působení na profil podstatně nižší než při jeho obtékání, zvláště v blízkosti flutteru, spolupůsobit mohly i plastické deformace v torzní tyčce. Pro další měření byly proto materiál i způsob uchycení torzní tyčky v modelu změněny. Ověřovací měření budou uskutečněna i při podstatně nižších rychlostech, než odpovídají flutteru.

5. Literatura

Horáček J., Kozánek J., Veselý J.: Dynamic and stability properties of an aeroelastic model, in: *Sb. Inženýrská mechanika 2005*, 9-12.5.2005, Svatka, CD-ROM, 12 p.

Horáček J., Luxa M., Vaněk F., Veselý J., Vlček V. : Návrh experimentálního zařízení pro studium nestacionárních 2D aeroelastických jevů optickými metodami. *Výzkumná zpráva ÚT AV ČR Z 1347/04*, Praha 2004

Matas R., Vlček V.: Ověřování numerického řešení 2D proudění v pokusných ventilech s pevnou a pohyblivou kuželkou, in: *Colloquium Fluid Dynamics 2003*, ÚT AV ČR, Praha 2003, pp.81-82.

Vlček V., Luxa M., Vaněk F., Vávra J., Veselý J.: Měření aeroelastických vlastností kuželky ventilu s využitím optických metod. *Výzkumná zpráva ÚT AV ČR 1352/04*, Praha 2004.