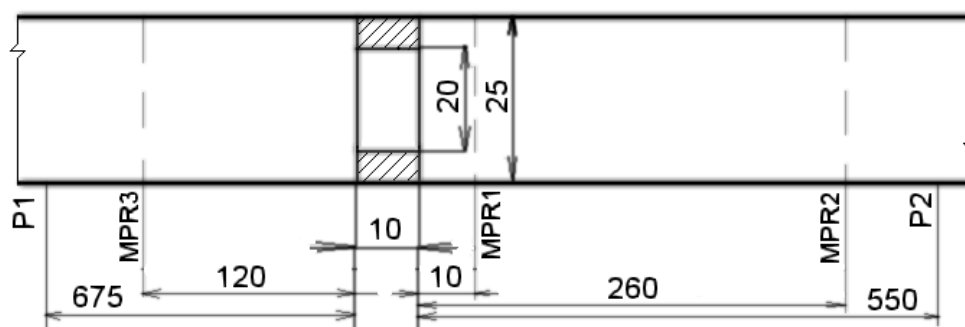


## LDA měření nestacionárního proudění v dvourozměrném poli

Pavel Zubík, Ústav vodohospodářského výzkumu.

V průběhu roků 1998 a 1999 byla provedena první a druhá etapa měření v rámci grantu GAČR 101/97/0826 „Hydroelastická interakce proudící tekutiny s pružnou stěnou kanálu“. Úkolem bylo změřit a pro výpočtový model dodat okrajové verifikační hodnoty rychlostí napříč kruhovým průřezem při jeho časové proměnlivosti. V první etapě bylo měřeno na skleněné trubici s a bez ostrohranné překážky a v druhé etapě na plastové pružné hadici již bez vkládané překážky.

Použité měřicí zařízení - souprava laser-dopplerovského anemometru (LDA) pro synchronní měření dvou složek vektoru rychlosti v jednom bodě. Souprava sestává z argonového laseru o výkonu 300 mW, optických prvků (ohnisková vzdálenost  $f = 110$  mm), včetně Braggových cell pro elektrooptický shift, jednoosého lineárního traverzačního zařízení, vyhodnocovacího dvoukanálového procesoru a řídicího počítače třídy PC.



Zkušební trať - uzavřený okruh s oběhovým čerpadlem v zásobní nádrži a pulzačním zařízením. Měření byla prováděna na 3 metry dlouhém přímém úseku vytvořeném ze skleněných trubek s vnitřním průměrem 25 mm. Uvnitř trubice byla upevněna ostrohranná překážka - clona. Celkové uspořádání zájmové části zkušební okruhu je na následujícím schématu. Pro druhou etapu byl 0,5 m dlouhý úsek skleněné trubice nahrazen plastovou hadicí.

Postup měření - optická soustava laserového anemometru byla ustavena do osy procházející osou trubice v místě MPR1 nebo MPR2 případně MPR3, přičemž obě tyto osy byly na sebe kolmé. Poté byla měřena podélná složka vektoru rychlosti, postupně ve dvaceti pěti bodech ležících na ose optické soustavy od jedné stěny k protější stěně trubice. Vzdálenost měrných bodů byla 1 mm. První a poslední bod ležel ve vzdálenosti 0,5 mm od stěny. Takto bylo provedeno celkem 15 měření. Tato sada měření pokryla kombinace proudění bez pulzací, proudění oscilačního bez konstantní složky a proudění pulzačního s konstantní složkou a to vše v hladké trubici bez překážky a v trubici s ostrohrannou překážkou. V případech, kdy byla v trubici clona, bylo měřeno proudění v jednom průřezu před a ve dvou různých vzdálenostech za clonou vzhledem k transportnímu směru proudění.

Princip LDA je příčinou toho, že záznam zjištěných rychlostí v právě měřeném bodě je vždy časová řada hodnot se zcela nepravidelným krokem. Protože probíhající nestacionární děj je periodický, bylo možno záznam výše zmíněné časové řady doplnit informací o okamžicích, kdy sledovaný děj právě probíhá zvoleným bodem ve své fázi. K tomuto účelu byl použito optoelektronické zařízení sledující pohyb pulzátoru. V následném kroku zpracování záznamu byly mnohasekundové časové řady seřazeny do intervalu o časové délce jedné periody.

Následně byly statistickým zpracováním získány typické střední průběhy měřené složky vektoru rychlosti přes jednu relativní periodu  $T = 1$  pro každý měřený bod. Perioda byla rozdělena na 40 fázových kroků. Také byly vyhodnoceny příslušné střední kvadratické odchylky, tedy rozptyl těchto středních průběhů.

Pravděpodobně teprve následující krok zpracování přináší informaci ve formě dostatečně názorné. Vezmeme-li závislou hodnotu z předchozího grafu v okamžiku  $T = 0$  pro každý měřený bod, můžeme vykreslit průběh příslušné funkce napříč profilem v okamžiku námi zvoleného počátku periody. Následně provedeme totéž s malým posunem o zvolené  $\Delta T$ . Takto lze získat libovolně členěnou sadu profilových průběhů žádané hodnoty. V příloze č.1 je příklad průběhu podélné složky rychlosti napříč měřeným profilem ve čtyřiceti dílčích krocích jedné periody tohoto nestacionárního periodického jevu ve skleněné trubici.

Je nutno konstatovat, že gradient rychlosti v těsné blízkosti stěn trubice (v řádu několika jednotek desetin milimetru) nebyl tímto měřením zjištěn. Příčiny jsou dvě. Jedna je dána principem LDA a nutností použít čočku s přiměřeně velkou ohniskovou vzdáleností (pro danou celkovou velikost měřeného prostoru). Následkem je relativně významná délka (v podélném směru s radiálou) mikroprostoru - 0.3 mm, jenž s jistou nadsázkou nazýváme „bod měření“. To poněkud potlačuje prostorovou rozlišovací schopnost. Druhou příčinou je volba měření od jedné stěny až ke druhé stěně a tudíž, z důvodu přílišné časové náročnosti, nemožnost měřit ve výrazně jemnější síti bodů.

Při měření na plastové hadici se objevily očekávané problémy s nemožností měření v tak malé vzdálenosti od stěny jako u skleněné trubice. Příčinou je ne zcela čirý materiál hadice a tudíž rozzářené bodů průchodu laserových paprsků stěnou. Proto bylo měřeno v nejmenší vzdálenosti od stěny 2 mm. Hlavní účel druhé etapy měření – zjištění vlivu deformace stěny hadice (v důsledku periodických změn tlaku) na tvar a časový vývoj rychlostního pole - však do doby vzniku toho příspěvku nebyl naplněn. Protože použitá hadice byla příliš tuhá, deformace stěn byla malá a výše popsaným měřením metodou LDA byly naměřeny totožné výsledky jako na skleněné trubici. V současné době probíhá nadále hledání vhodnější hadice a měření bude ještě do konce roku 1999 doplněno.

V roce 1998 bylo provedeno měření nestacionárního proudění v savce Francisovy turbíny pro ČKD Blansko Engineering, a.s. za finanční podpory grantu PZ-HZ/11/99 „Měření prostorového proudění reálné tekutiny laserovými anemometry“.

Použité měřicí zařízení bylo totožné jak je uvedeno výše pouze ohnisková vzdálenost hlavní čočky byla jiná – přiměřená velikosti měřeného prostoru.

Postup měření:

1. Po vypuštění vody ze zkušebního okruhu turbíny byly do předem připravených dvou otvorů v kuželu savky vsazeny kvalitní planparalelní skleněné průzory.
2. Optická soustava laserového anemometru byla ustavena do osy oken v kuželu savky turbíny. Společná osa oken prochází osou stroje a je na ní kolmá.

3. Postupně bylo měřeno ve třiceti bodech ležících na ose okna, od osy stroje ke stěně savky. Tedy, bylo měřeno na jedné radiále. Vzdálenost měrných bodů byla 6 mm. Takto bylo v tomto místě měřeno při celkem sedmi provozních bodech turbíny.
4. Po ukončení měření byly skleněné průzory nahrazeny stálými zaslepovacími zátkami.

Nejnázornější představu o charakteru zjišťovaného nestacionárního proudění v savce turbíny poskytuje příloha č.3. Tento graf je však produktem několikafázového statistického zpracování přibližně jednoho milionu naměřených hodnot rychlostí.

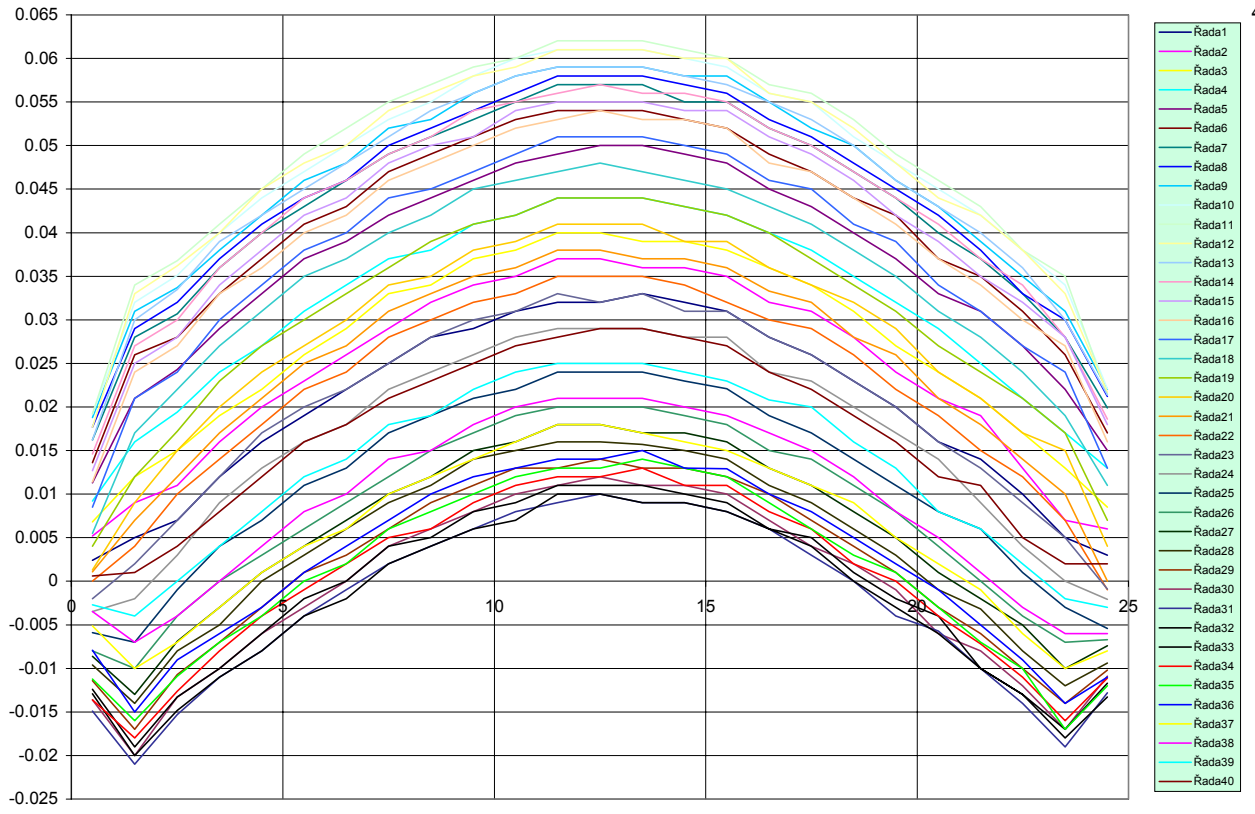
Provozní režimy turbíny byly úmyslně nastavovány mimo optimum stroje za účelem studia nestacionárního jevu probíhajícího za oběžným kolem v savce turbíny (charakteristickým projevem je rotující vírový cop). Jak už bylo výše zmíněno, princip LDA je příčinou toho, že záznam zjištěných rychlostí v právě měřeném bodě je vždy časová řada hodnot s nepravidelným krokem. Protože probíhající nestacionární děj byl poměrně silně periodický bylo možno zaznamenávané časové řady doplnit informací o okamžicích, kdy sledovaný děj právě probíhá zvoleným bodem ve své fázi. Pracovníci ČKD Engineering a. s. zhotovili zařízení, jež na základě tlakových pulzací na stěně savky vytvářelo potřebný značkovací signál. V následném kroku zpracování záznamu byly mnohasekundové časové řady seřazeny do intervalu o časové délce jedné periody. Poté byly statistickým zpracováním získány typické střední průběhy přes jednu relativní periodu pro každou měřenou složku rychlosti a pro každý měřený bod na příslušném poloměru R. Také byly vyhodnoceny příslušné střední kvadratické odchylky, tedy rozptyl těchto středních průběhů.

Následující krok zpracování již přináší informaci ve formě užitečné pro vývojové pracovníky vodních strojů. Stejným postupem jako v předchozí úloze - skládáním hodnot z měření v jednotlivých bodech po dílčích fázových krocích - můžeme získat libovolně členěnou sadu profilových průběhů žádané hodnoty. V příloze č. 2 jsou znázorněny průběhy podélné složky rychlostí napříč měřeným profilem ve čtyřiceti dílčích krocích jedné periody tohoto nestacionárního periodického jevu.

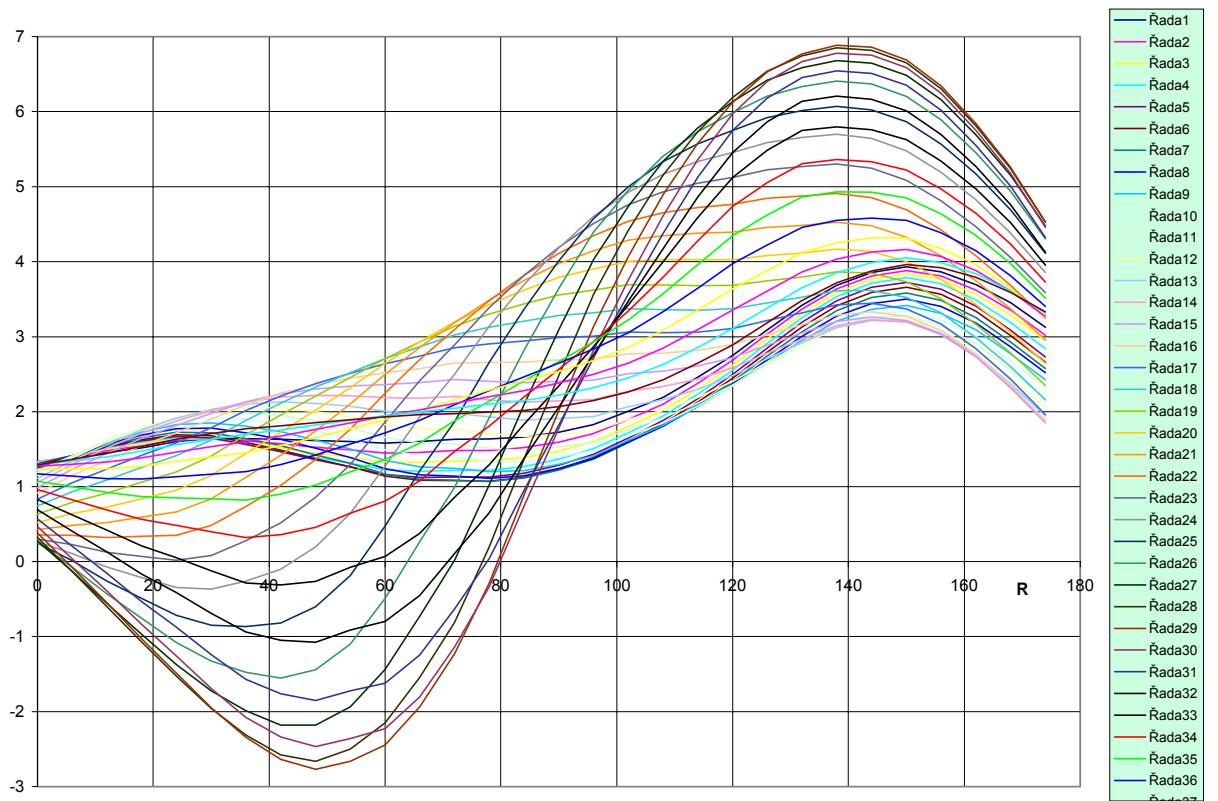
Další zvláštnost provedeného měření spočívá v tom, že složky rychlosti x a y byly měřeny zcela synchronně a proto bylo možno získat informaci o rozptylu úhlu alfa. Při nezávislém měření těchto dvou složek lze vektorově skládat pouze jejich časově střední hodnoty ale není možno vektorově sčítat okamžité hodnoty. Proto nelze nijak usuzovat na rozptyl směru výsledného vektoru.

Vzhledem k tomu, že známe okamžité průběhy závislých hodnot přes celou opakující se periodu, lze s jejich pomocí vykreslit jeden typický okamžitý stav rozložení rychlostí napříč profilem. V příloze č. 3 jsou izolinie meridiálních rychlostí a je zde velmi dobře patrné jádro „copu“ víru. Je třeba mít na mysli že se neustále otáčí kolem středu savky a toto je pouze jeden okamžitý stav jeho polohy.

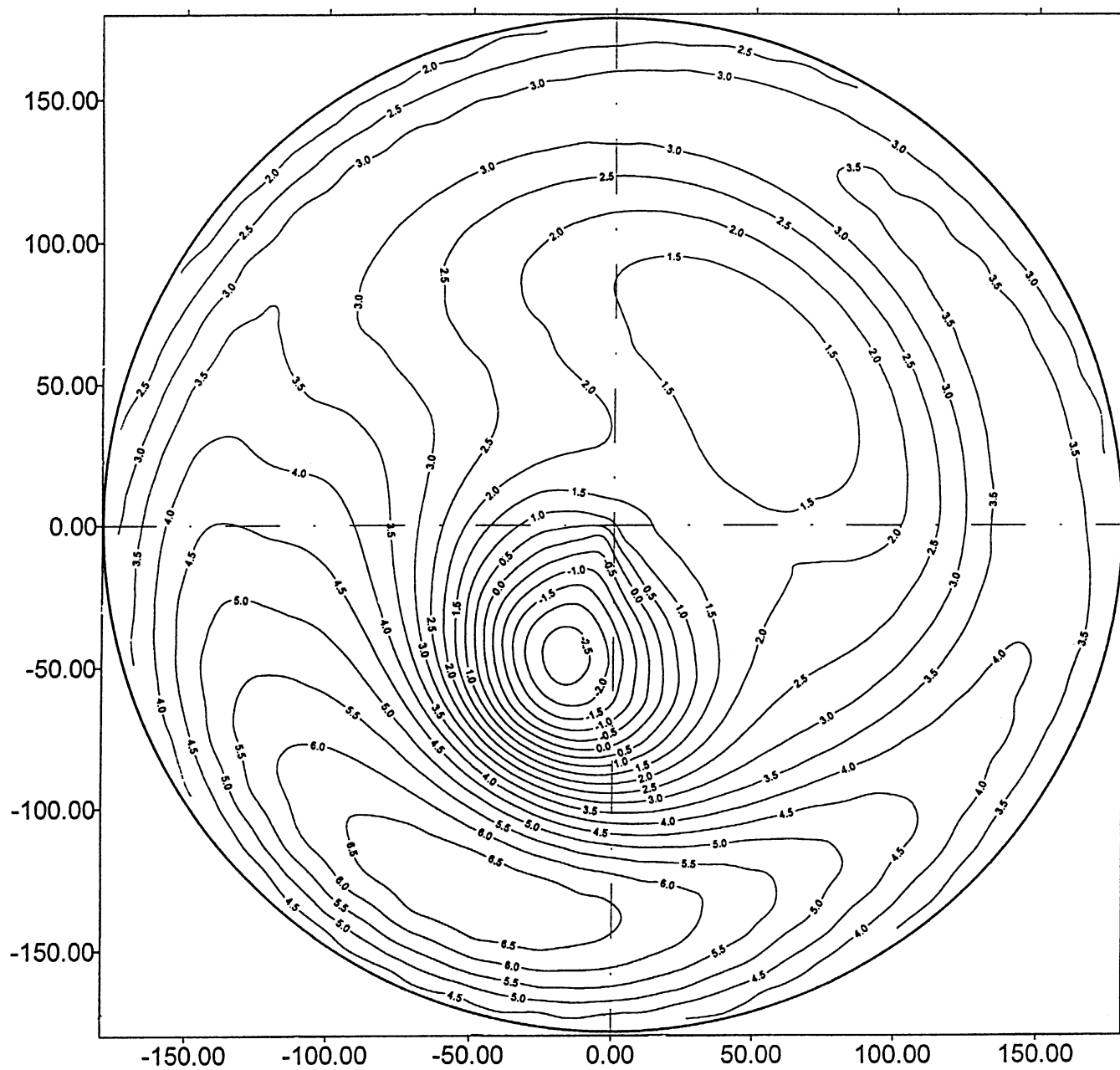
Na závěr je nutno konstatovat že zjištěný gradient rychlosti v okolí jádra víru je ve skutečnosti větší než vyplývá z uvedených grafů. Příčiny jsou dvě. Jedna je dána nutností za daných podmínek použít čočku s velkou ohniskovou vzdáleností. Ta je příčinou poměrně výrazně protáhlého tvaru (v podélném směru s radiálou) mikroprostoru, jenž reprezentuje „bod měření“. To poněkud potlačuje prostorovou rozlišovací schopnost. Druhou příčinou je, že poloměr, na kterém se pohybuje jádro víru, a doba jeho oběhu okolo osy stroje se neustále mírně mění. Protože konečná informace je založena na mnoha tisících průchodů víru přes měrnou radiálu, jsou průměr a poloha tohoto copu poněkud „rozostřeny“.



Příloha č.1 : příklad průběhu podélné složky rychlosti napříč měřeným profilem ve čtyřiceti dílčích krocích jedné periody nestacionárního proudění ve skleněné trubici.



Příloha č.2 : příklad průběhu meridiální složky rychlosti v savce turbíny ve čtyřiceti dílčích krocích jedné periody nestacionárního proudění.



Příloha č.3 : rozložení meridiální rychlosti v savce turbíny.