

Plán standardizace – Program rozvoje metrologie 2014

Zpráva pro závěrečnou oponenturu

Číslo úkolu: PRM č.VII/7/14

Název úkolu : Stanovení vhodnosti použití vybraných typů
hydrometrických vrtulí

Zadavatel: Česká republika – Úřad pro technickou normalizaci,
metrologii a státní zkušebnictví, organizační složka státu

Řešitel: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G.Masaryka v.v.i.
Podbabská 30, 160 00 Praha 6

Vypracoval: Ing. Libuše Ramešová, Ing. Daniel Mattas, CSc.

Schválil: Ing. Libuše Ramešová

Datum : Praha 3.listopadu 2014

Rozdělovník : 2x ÚNMZ,
řešitelé 2x
opONENTI 2x

Výtisk č.

Obsah:

1. Úvod	3
2. Metodika	3
3. Vrtule Ott C-2	11
4. Vrtule Ott C-31	22
4.1 Vrtule Ott C-31 s propelerem 1	23
4.2 Vrtule Ott C-31 s propelerem 2	27
4.3 Vrtule Ott C-31 s propelerem 4	30
4.4 Vrtule Ott C-31 s propelery R, A a F	33
4.5 Zhodnocení	36
5. Diskuse	38
6. Závěry a doporučení	40
7. Literatura	43
Příloha 1 – plánovací list úkolu	44

1. Úvod

Hlavním cílem této práce je stanovení náhodné složky nejistoty kalibrace (definici viz ČSN ISO 748) pro vybrané typy hydrometrických vrtulí používané v ČR a jejich upevnění při měření, a dále doporučení pro výběr vrtule a jejího propeleru (pokud jich je k dispozici více) tak, aby byly pokud možno minimalizovány nejistoty měření průtoku.

Z hydrometrických vrtulí jsou v ČR nejpoužívanější výrobky německé firmy Ott typů C-2 a Ott C-31. Ostatní typy měřidel jsou zastoupeny jen výjimečně, takže naše databáze neposkytuje dostatek údajů a z tohoto důvodu jsme se jinými typy měřidel nezabývali.

Provedená rešerše nám neposkytnula prakticky žádné použitelné výsledky. Jediný materiál, který mluví o náhodné složce nejistoty kalibrace hydrometrických vrtulí je norma ČSN EN ISO 748 [1], která též v příloze E 4.3 v tab. E 5 uvádí orientační tabulku hodnot náhodných nejistot pro několik rychlostí a jednak individuální, jednak skupinovou kalibraci. V této tabulce není žádným způsobem zohledněn typ měřidla ani jeho upevnění. Řešitelé se danou problematikou zabývali již dříve, avšak jen pro vrtule typu Ott C-2 a použili poněkud jinou metodiku [2].

Je známo, že náhodná složka nejistoty kalibrace závisí na množství faktorů, z nichž řada není kvantifikovatelná (např. vliv údržby) nebo se je dosud nepodařilo kvantifikovat (např. vliv opotřebenosti při provozu), řada z nich není ani popsána a lze předpokládat, že některé dosud nejsou ani známy. Autorům zprávy se již dříve podařilo kvantifikovat vliv teploty při kalibraci vrtulí typu Ott C-2 a měření s nimi (viz [3]), který se výrazněji projevuje pro malé rychlosti a teploty nižší než ca 5 °C a který tudíž v této oblasti poněkud přispívá k nejistotě kalibrace.

2. Metodika

Pro zpracování jsme použili převážně archivní data, pouze několik málo údajů bylo získáno pro doplnění archivních dat v rámci úkolu. Množství nových dat bylo velmi silně omezeno finančními prostředky, které zadavatel na úkol přidělil.

Archivní data jsou bohužel časově omezena na dobu od roku 1992, kdy se začalo pro jejich vyhodnocení i archivaci používat výpočetní techniky. Lístková kartotéka, která zahrnovala data prakticky od počátků kalibrací hydrometrických vrtulí ve VÚV, tedy ca od roku 1930, byla bohužel totálně zničena za povodně r. 2002.

Relevantní údaje z databáze ČKSVV byly exportovány ve formátu CSV a převedeny do spreadsheetů programu MS Excel. Jednalo se zejména o:

- číslo kalibračního osvědčení, datum kalibrace, teplota vody
- typ vrtule, číslo těla a typ propeleru, jeho číslo a stoupání, způsob upevnění vrtule
- konstanty kalibrační rovnice

Pro každé tělo vrtule byl vytvořen zvláštní spreadsheet, v němž bylo provedeno i primární zpracování dat.

První operací byla důkladná kontrola primárních dat. Na základě této kontroly byla ze zpracování vyřazena data pro kombinace tělo + propeler, které byly kalibrovány méně než třikrát (jen v případě vrtulí Ott C-2), dále data s chybami, které znemožňovaly identifikaci propeleru (např. stoupání neodpovídalo typu propeleru, číslo propeleru bylo neúplné a pod.) a data s evidentními chybami v konstantách kalibračních rovnic (zejména z období 1992 – 1997 kdy se data do databáze vkládala ručně).

Pro každou kombinaci těla, propeleru a upevnění vrtule byly ze všech kalibračních rovnic vypočteny rychlosti v [ms^{-1}] pro řadu specifických otáček n [s^{-1}] (tato řada byla stejná pro

všechny typy propelerů). Pro každou kombinaci těla, propeleru a upevnění vrtule byly z těchto rychlostí určeny jejich minimální, střední a maximální hodnoty a výběrová směrodatná odchylka s [ms^{-1}] pro každé zvolené specifické otáčky.

V první fázi zpracování vrtulí typu Ott C-2 byly pro každý typ propeleru vyneseny grafy směrodatných odchylek rychlostí s jako funkce specifických otáček n pro jednotlivé propelery a typ upevnění. Protože takto získané závislosti pouze ukázaly, že prakticky každá kombinace tělo vrtule – propeler má jedinečné vlastnosti (příklady viz obr. 1 a 2), přičemž ale až na několik málo výjimek všechny tyto výsledky spadají do jedné širší oblasti, učinili jsme základní předpoklad, který dále podstatným způsobem ovlivnil metodiku zpracování:

Vzhledem k tomu, že všechny hydrometrické vrtule pocházejí od jediného výrobce a jsou několika málo shodných typů, nadále předpokládáme, že ze statistického pohledu všechny vrtule téhož typu (tj. kombinace tělo vrtule + příslušný propeler + způsob uchycení) pocházejí z jediné populace.

Tento přístup dovoluje zpracování i pro vrtule, které se v databázi vyskytují sporadicky.

Aby byly výsledky vzájemně srovnatelné, byl pro všechny kombinace těla a propeleru typu vrtule Ott C-2 proveden náhodný výběr dat tak, aby počty případů byly shodné. Pro vrtule typu Ott C-31 je situace výrazně složitější, protože počet kalibrací pro jednotlivé kombinace tělo + propeler + upevnění vrtule se v mnoha případech velmi výrazně lišil, takže v podstatě nebylo možné používat náhodný výběr konstantního rozsahu. Vzhledem k tomu, že v průběhu předběžných analýz se ukázalo, že trendy jsou svým charakterem celkově velmi podobné, používali jsme při zpracování vrtulí Ott C-31 vždy všechna dostupná data. Přehled dostupných dat uvádějí tabulky 1 (pro vrtule Ott C-2) a 2 (pro vrtule Ott C-31).

Z vybraných dat jsme pak pro každý typ vrtule zvolili řadu specifických otáček (frekvence otáčení) propeleru n [s^{-1}] a pro tyto specifické otáčky jsme z kalibračních rovnic vypočetli rychlosti v_i [ms^{-1}]. Ty jsme pak dále zpracovávali statistickými metodami.

V první řadě byla pro každý typ vrtule a každé n vypočtena průměrná rychlost v , její minimální a maximální hodnota, její směrodatná odchylka s [ms^{-1}], a součinitel variace u [-] ($u = s/v$). Přitom směrodatná odchylka zde odpovídá standardní absolutní nejistotě kalibrace, součinitel variace pak standardní relativní nejistotě kalibrace. Současně bylo zhodnoceno rozdělení rychlostí pro každé dané specifické otáčky jednak pomocí klasického histogramu (resp. empirické funkce hustoty pravděpodobnosti), jednak zejména v okrajových oblastech podstatně citlivějšího krabicového grafu a hlavně s pomocí pravděpodobnostního grafu (empirické distribuční funkce). Pokud krabicový graf i pravděpodobnostní graf ukázal odlehle hodnoty, byly před dalším zpracováním dat tyto případy vyřazeny.

Po případném vyřazení případů poskytujících odlehle hodnoty byly ještě jednou přepočítány základní statistiky a vyneseny jejich grafy. Směrodatná odchylka s byla vynášena jako závislost $s = f(n)$ a $s = f(v)$, podobně i součinitel variace u byl vynesěn v závislosti jednak na specifických otáčkách n , jednak na rychlosti v .

Dalším krokem bylo nalezení adekvátního empirického modelu, co nejlépe vystihujícího průběh dat. Zde byl velkou pomocí program SigmaPlot 2000 fy SPSS, který obsahuje mj. modul Regression Wizard, který jsme použili jak pro nalezení optimálního typu modelu, tak i posléze pro nalezení empirických konstant modelů pro jednotlivé typy vrtulí. Pro kontrolu byly ještě tyto konstanty vynášeny jako funkce stoupání propeleru, a případně i jako funkce upevnění vrtule.

Vzhledem k tomu, že z praktického pohledu za podstatně důležitější považujeme závislosti na rychlosti než na frekvenci otáčení, jsou ve zprávě prezentovány pouze tyto výsledky.

Tabulka 1

Vrtule C-2 - přehled

tělo	propeler						
	1	2	3	4	5	6	??
37185		9	3			2	
37186		9	2	2	1		
40515	4	3					1
48559	5	1	3		4		
48560	7+13	31	6		15	4+1	
54333	2+2+1	4	3	5	5	4	
54371	6		5			7	
69803		4	4				
69804	1	9	6			8	
69805		10	5			2	
85391	5+13	1+23+1	1+16		6+11	16	
108997		7					
112243	7	8+2	1		8	6	
112365	3		2		3		
115285			3			11	
118103			5			5	
121253	4		3				
123514	7	6	7		6	8	
123609	5				4		
129864			3		1		
129865		7	4			3	
129866			7			7	
132156	19	23	7+26		18	19	
132170			3			2	
132225			2		4	2	
132226		1	2			3	
132227	7	6	5	6	1+1	5	
132228		5	3			4	
141762			5		9	5	
146895			7			6+1	
168820		3	2			1	
168877	8				5		
185849	5	5	6	5	5	5	
198012			3		1	1	
198051	2	3			3	3	
198054	2		3		4	2	
198057	1	1	9		3		
232295	3		3				
bodů celkem	121	168	163	18	113	129	

Tabulka 2

Vrtule C-31 - přehled

propeler	1						2					4					R				A	F	
tělo/závaží	tyč	5	10	25	50	100	tyč	10	25	50	100	tyč	5	10	25	50	R tyč	R+5	R+10	R+25	A tyč	F tyč	
16543			1	2				1	1					1	1								
16543			1	2				1	1					1	1								
16544				6																			
16608	1											2			3								
16609				1	2	2			2	2	2												
16610				1	1				1	1													
16638				3																			
16639	2			6																			
19091	5			11																			
19400	3			6																			
19436	1			1	1																		
19439	1						1					1											
19441	2			2	1							1			1								
19556			4	2				2	2			3	5	5	1								
19557	2											7											
19558	1											7	1	3									
30175	6			7																			
30176	7											6											
30178	1											1+1											
30179	2			1			2					8			2								
30184		1+1	1+1	2+1	1	1						4+4	3	4									
30185									1	1+1	1+1	1+2	1+1	1+1									
30186												5			1								
38232	1			9+1								10			3		3						

propeler	1						2					4					R				A	F	
	tyč	5	10	25	50	100	tyč	10	25	50	100	tyč	5	10	25	50	R tyč	R+5	R+10	R+25	A tyč	F tyč	
130375	1			1								6			4								
135699	1			1								7			3								
135725				1	1	1						2											
141853	3			6											3								
141854									2	1	2	4+3	1	3	1								
162401							1		1			6	8	5									
162402							1		1			4			2								
201812												5	5	5									
201822																	3	2	2	5			
bodů celkem	87	7	30	140	31	20	29	6	46	22	14	274	51	64	50	2	91	2	2	5	33*	33	

Pozn.: Pokud se pro dané tělo a typ upevnění v poli tabulky vyskytuje součet (např. 7 + 5 + 3), znamená to, že tělo bylo při daném upevnění kalibrováno s více různými propelery daného typu (v uvedeném příkladu se třemi, z toho s prvním sedmkrát atd.).

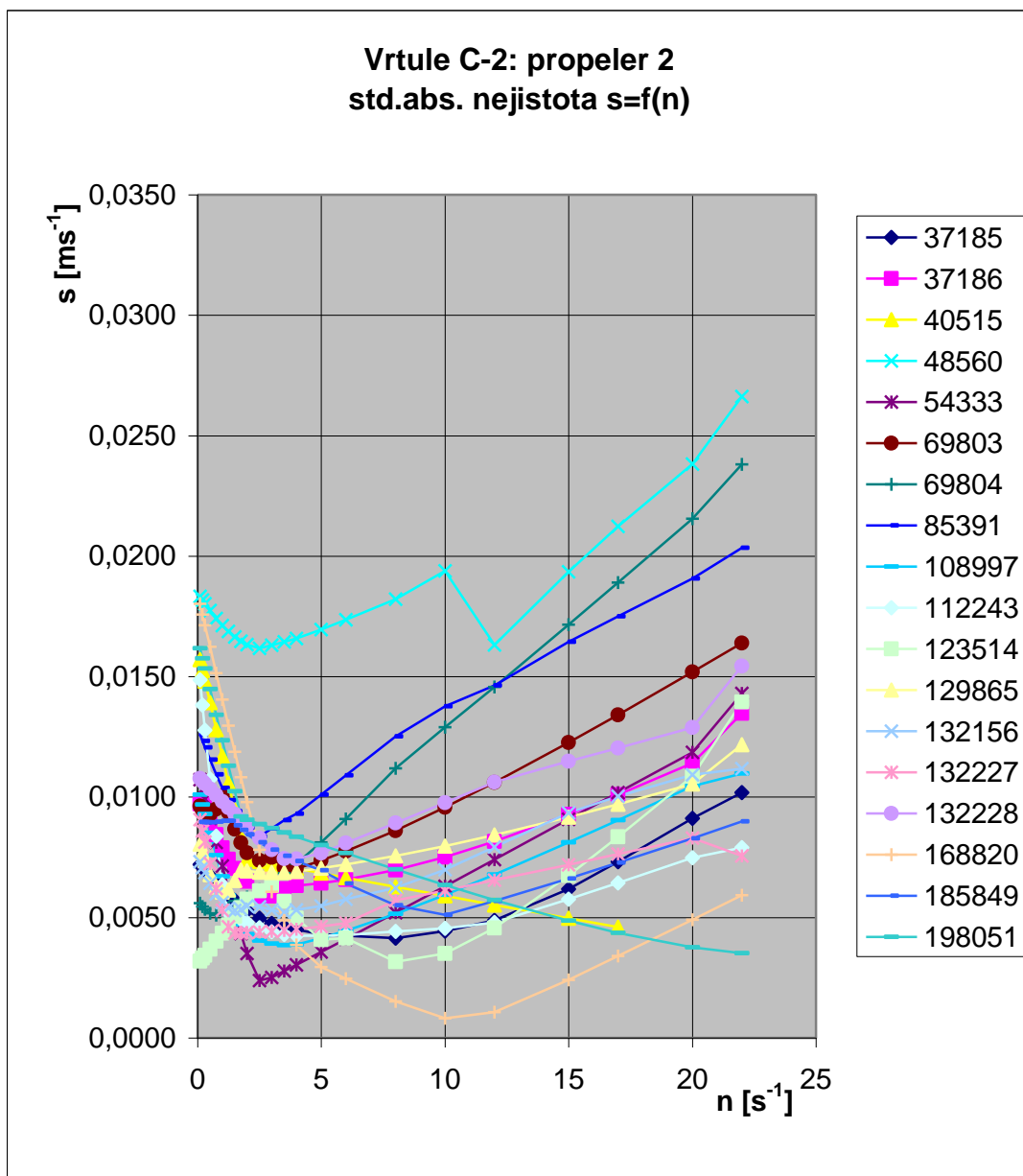
* data byla doplněna novými kalibracemi

Vrtule Ott C-2

Protože podrobný popis výsledků zpracování vrtulí typu Ott C-2 je uveden ve zprávě k průběžnému oponentnímu řízení, zde uvádíme jen shrnutí nejdůležitějších výsledků.

Pro vrtule Ott typu C-2 jsme použili pouze archivní data, kterých bylo dostatek. Výjimku tvoří propeler č. 4 o stoupání 0,5 m, který je v datech zastoupen pouze čtyřmi kusy a i podle dat kalibrací je evidentně využíván velmi sporadicky. Kompletní přehled vrtulí, resp. kombinací tělo + propeler a počtu kalibrací těchto jednotlivých kombinací uvádí tabulka 1.

Jak je uvedeno výše, pro každý typ propeleru jsme vytvořili zvláštní graf $s = f(n)$, v němž jednotlivé řady dávají průběh směrodatné odchylky v závislosti na specifických otáčkách pro jednotlivé vrtule (kombinace tělo + propeler) – ukázka viz obr. 1. Analýza těchto grafů vedla k pro nás překvapivému zjištění - závislost směrodatné odchylky rychlosti na specifických otáčkách je zcela individuální pro jednotlivé kombinace tělo + propeler. Dokonce i v těch



Obr. 1 Průběh závislosti $s = f(n)$ pro jednotlivé vrtule s propelerem č. 2

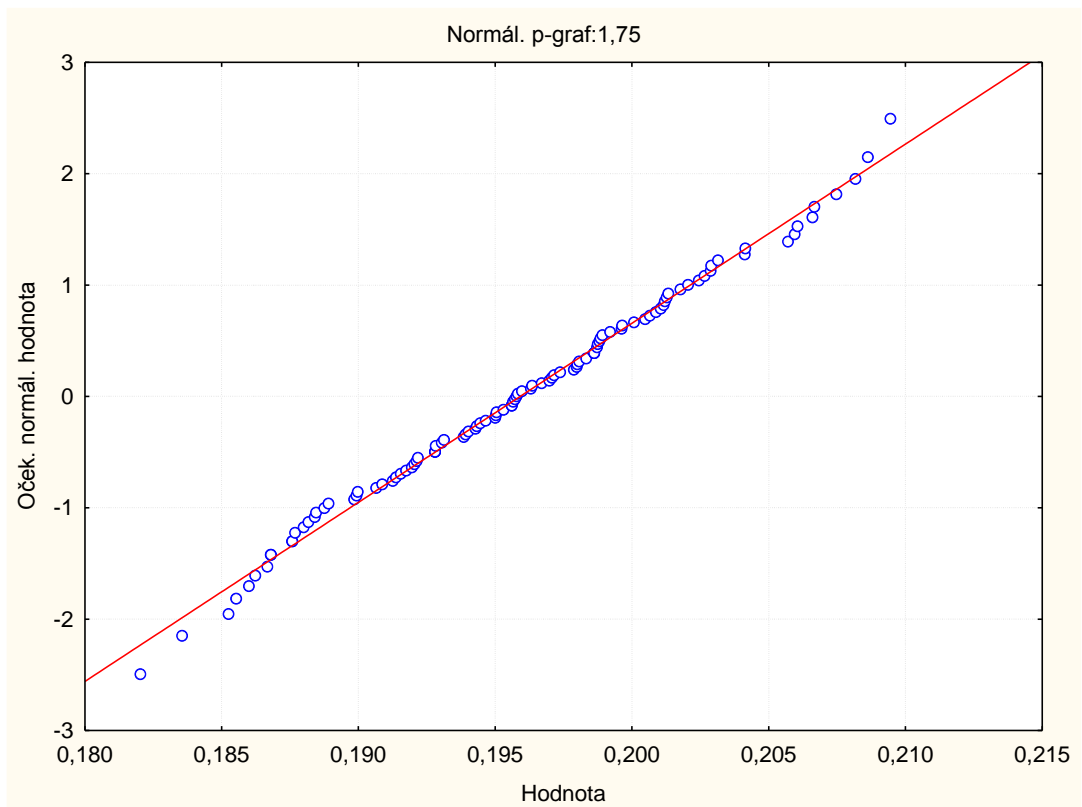
několika případech, kdy jedno tělo bylo kalibrováno s více propelery téhož typu je průběh závislostí zpravidla zcela odlišný.

Z grafů je však patrné, že až na velmi vzácné výjimky se všechny hodnoty pohybují v jistém omezeném prostoru a celkový charakter jednotlivých závislostí je, byť tu a tam i s většími odchylkami, relativně obdobný. I tyto závěry bereme do značné míry jako příspěvek k potvrzení naší hypotézy, že všechny vrtule téhož typu pocházejí z jediné statistické populace.

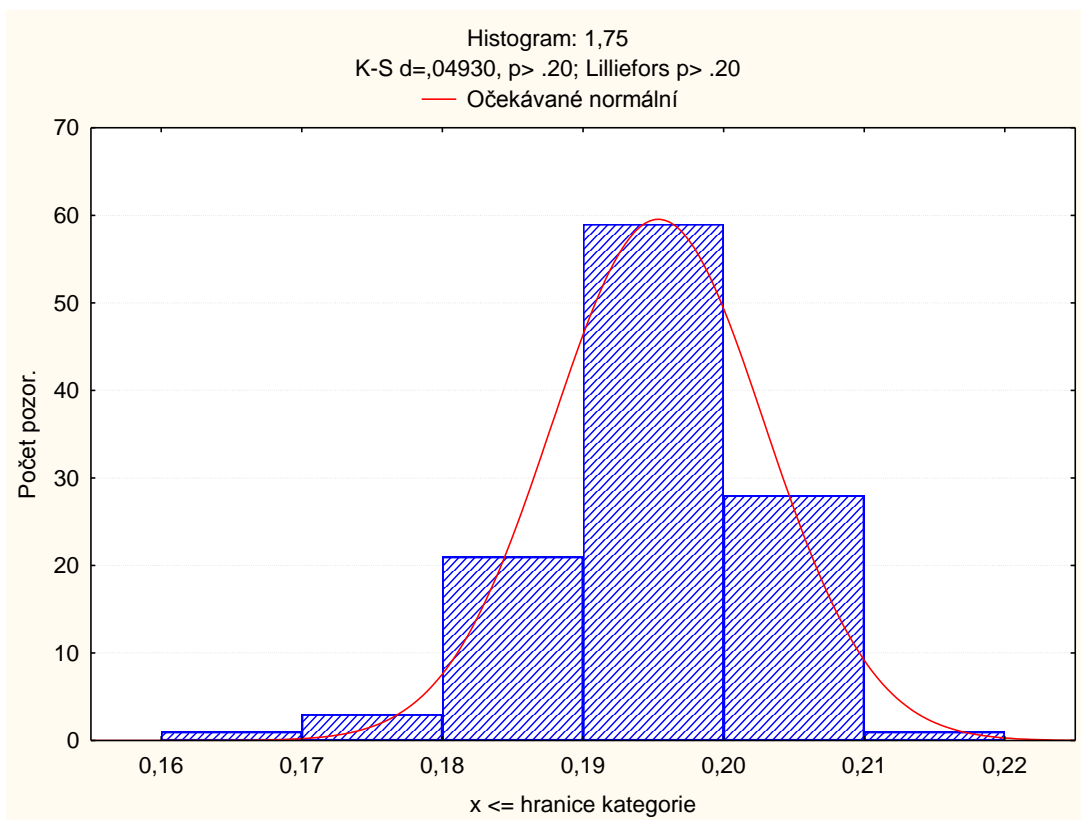
Aby výsledky pro vrtuli Ott C-2 byly srovnatelné, provedli jsme z dat náhodný výběr kalibrací tak, abychom pro všechny typy vrtulí získali stejný počet dat – minimum kalibrací (113) máme pro propeler č. 5, takže všechna ostatní data byla zredukována na stejný počet případů. Vrtule s propelerem č. 4 byla s ohledem na velmi malou frekvenci kalibrací (a tedy i její zanedbatelné praktické využívání) a tudíž i nedostatek dostupných dat ze zpracování vyřazena. Jak uvádíme v kap. Metodika, byly dále zpracovány a analyzovány základní statistiky (ukázka viz tab. 3) histogramy a krabicové a pravděpodobnostní grafy (ukázky viz obr. 2 a 3).

Tabulka 3 Základní statistiky – vrtule C-2 s propelerem č.2

n	N platných	Průměr	Medián	Minimum	Maximum	Sm. odch.	Směr. od.	Šikmost	Špičatost
0,1	113,000	0,023	0,023	-0,020	0,068	0,013	0,001	0,024	2,564
0,2	113,000	0,033	0,034	-0,008	0,075	0,012	0,001	-0,034	2,426
0,3	113,000	0,044	0,044	0,004	0,083	0,012	0,001	-0,092	2,301
0,5	113,000	0,065	0,065	0,027	0,097	0,011	0,001	-0,206	2,102
0,75	113,000	0,091	0,091	0,057	0,121	0,010	0,001	-0,333	1,971
1	113,000	0,117	0,117	0,087	0,145	0,009	0,001	-0,426	1,975
1,25	113,000	0,143	0,144	0,114	0,169	0,008	0,001	-0,469	1,990
1,5	113,000	0,169	0,169	0,141	0,193	0,008	0,001	-0,476	1,863
1,75	113,000	0,195	0,196	0,167	0,218	0,008	0,001	-0,501	1,688
2	113,000	0,222	0,222	0,194	0,242	0,007	0,001	-0,535	1,509
2,5	113,000	0,274	0,274	0,247	0,290	0,007	0,001	-0,612	1,336
3	113,000	0,326	0,326	0,300	0,339	0,007	0,001	-0,722	1,180
3,5	113,000	0,378	0,378	0,353	0,390	0,007	0,001	-0,786	1,116
4	113,000	0,429	0,429	0,405	0,442	0,007	0,001	-0,790	1,041
5	113,000	0,532	0,533	0,506	0,549	0,008	0,001	-0,756	0,983
6	113,000	0,636	0,636	0,606	0,656	0,009	0,001	-0,730	1,036
8	112,000	0,841	0,842	0,806	0,870	0,011	0,001	-0,742	1,164
10	112,000	1,047	1,049	1,007	1,081	0,013	0,001	-0,779	0,974
12	112,000	1,253	1,256	1,208	1,292	0,015	0,001	-0,794	0,734
15	109,000	1,562	1,565	1,509	1,609	0,019	0,002	-0,796	0,660
17	109,000	1,768	1,771	1,709	1,820	0,022	0,002	-0,786	0,582
20	108,000	2,076	2,080	2,010	2,136	0,026	0,003	-0,766	0,539
22	92,000	2,281	2,285	2,211	2,347	0,030	0,003	-0,683	0,331



Obr. 2 Pravděpodobnostní graf – vrtule C-2 s propelerem č. 2, $n = 1,75 [s^{-1}]$



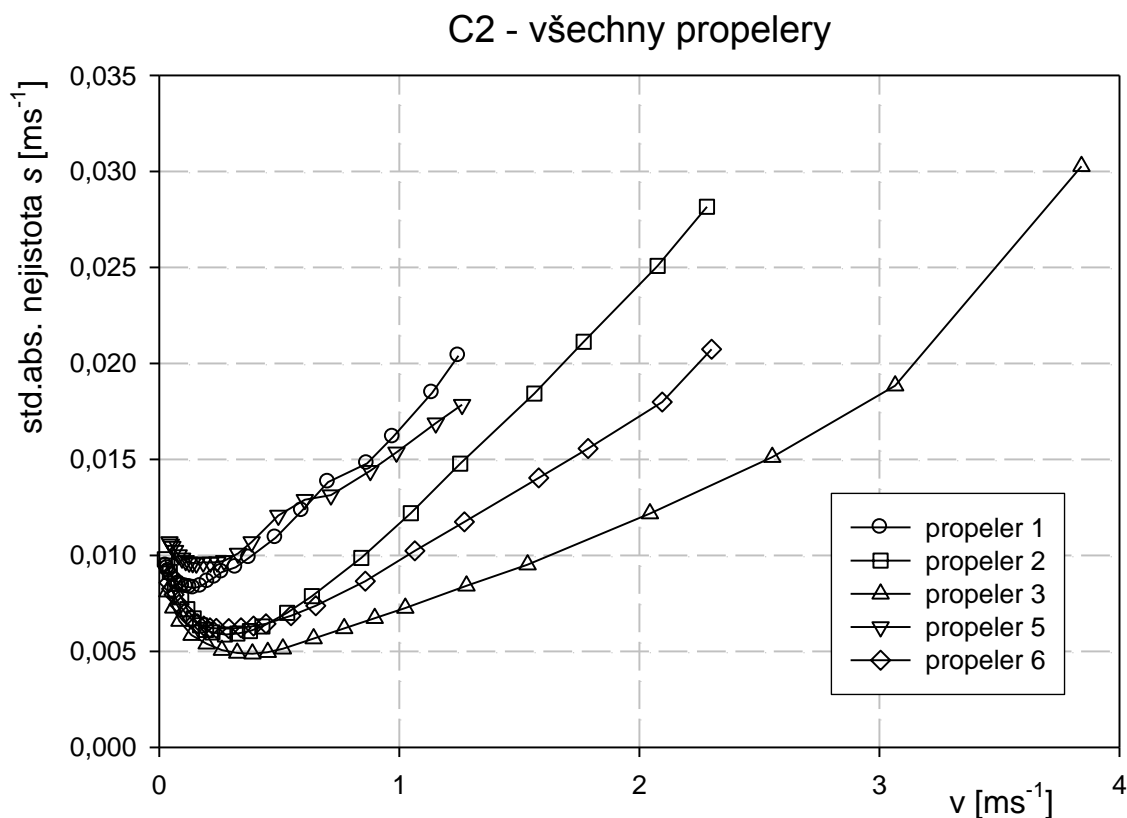
Obr. 3 Histogram rozdělení četnosti – vrtule C-2 s propelerem č. 2, $n = 1,75 [s^{-1}]$

S pomocí těchto grafů byly identifikovány odlehlé hodnoty, z nichž některé byly vzhledem k dosti nízké zvolené minimální frekvenci rotace propeleru i fyzikálně nemožné (viz např. dvě záporná minima v tab. 3), a data upravena odstraněním případů s těmito odlehlými hodnotami. Případy s odlehlými hodnotami se vyskytovaly v počtu jednotek (při původním celkovém počtu případů $N = 113$), takže data již nebyla dále upravována na stejný počet případů, který se lišil již jen zanedbatelně.

Po odstranění případů s odlehlými hodnotami jsme veškeré výpočty a vykreslení grafů zopakovali a provedli jejich novou analýzu. Ukazuje se, že pro většinu případů u všech typů vrtulí (tj. kombinace tělo + příslušný propeler) je rozdělení rychlostí pro dané specifické otáčky dosti blízké rozdělení normálnímu, poněkud větší odchylky se vyskytují pro větší frekvence otáčení, a také v okrajových částech pravděpodobnostních grafů.

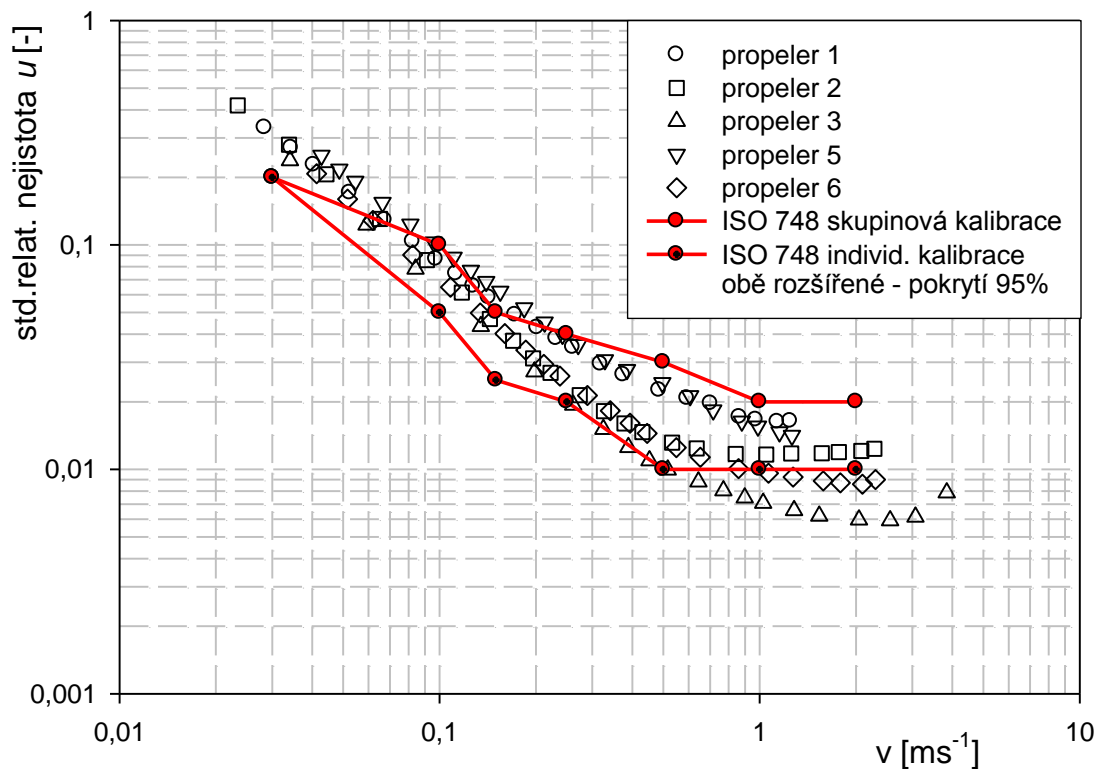
Dále jsme pro každý typ vrtule zpracovali grafy závislosti směrodatných odchylek rychlosti (čili absolutní standardní nejistoty) s jednak na specifických otáčkách propeleru n , jednak na rychlosti v . Stejným způsobem jsme vynesli i závislosti součinitele variace u (poměr směrodatné odchylky ku průměru, tj. relativní standardní nejistoty). V této zprávě však uvádíme jen grafy pro závislost směrodatných odchylek rychlosti (resp. absolutní standardní nejistoty) a součinitele variace na rychlosti vzhledem k tomu, že pro praktické využití jsou podstatně vhodnější než závislosti na frekvenci otáčení. Tyto grafy, pro lepší názornost skreslené pro jednotlivé typy vrtulí dohromady, uvádíme na obr. 4 a 5. Pro lepší čitelnost je graf závislosti standardní relativní nejistoty (resp. součinitele variace) vynesena v logaritmických souřadnicích. Současně jsme do něj pro porovnání vynesli hodnoty nejistot, udávané ČSN EN ISO 748 v tabulce E5 v příloze normy.

Zde je třeba upozornit, že námi zjištěné hodnoty jsou standardními nejistotami, zatímco ISO udává hodnoty rozšířené s pokrytím 95%, čili po přepočtu na stejné pokrytí by námi zjištěné hodnoty byly dvojnásobné.



Obr. 4 Vrtule C-2 - standardní absolutní nejistota $s = f(v)$

C2 - všechny propelery



Obr. 5 Vrtule C-2 – standardní relativní nejistota $u = f(v)$

Z grafu na obr. 4 vyplývá zajímavý poznatek – směrodatná odchylka rychlosti (čili absolutní standardní nejistota) má absolutní minimum při nenulové rychlosti. Přitom poloha tohoto minima zřejmě závisí na typu vrtule, resp. jejího propeleru. Přitom propelery totožného stoupání se chovají více-méně podobně. Ještě lépe je tato vlastnost (tedy obdobné chování propelerů stejného stoupání) patrná z grafu 4, zobrazujícího závislost součinitele variace (čili relativní standardní nejistoty) na rychlosti – křivky pro propelery shodného stoupání se prakticky překrývají. Evidentně propelery s nejmenším stoupáním (tj. propelery č. 1 a 5 o stoupání $k = 0,05$ m) mají relativní nejistoty poněkud větší než propelery s větším stoupáním.

Již nyní můžeme učinit jisté závěry z hlediska optimalizace náhodné složky nejistoty kalibrace hydrometrických vrtulí Ott C-2 při měření. Z grafu na obr. 5 je zřejmé, že relativní náhodná složka nejistoty je největší pro nejmenší rychlosti (a tedy i nejmenší frekvence otáčení propeleru) a dále velmi rychle klesá. Evidentně propelery č. 1 a 5 dávají pro stejné rychlosti nejistoty vyšší než propelery 2, 3 a 6.

Pokud porovnáme námi zjištěné hodnoty relativní nejistoty s hodnotami udávanými ČSN EN ISO 748, je na první pohled patrné, že *nejistoty při použití vrtulí Ott C-2 jsou normou dosti výrazně podhodnoceny*. a i pro rychlosti větší námi získané hodnoty odpovídají spíše hodnotám, které ISO uvádí pro skupinovou kalibraci. Je nutné připomenout, že naše hodnoty jsou standardní nejistoty, ISO udává nejistoty rozšířené (s pokrytím 95 %), k čemuž je při porovnání nutno přihlídnout.

Posledním krokem bylo nalezení vhodného empirického modelu závislosti směrodatné odchylky a součinitele variace jednak na frekvenci otáčení propeleru, jednak na rychlosti proudění. Tyto práce byly provedeny v programu SigmaPlot s využitím modulu Regression

Wizard. Vzhledem k tomu, že z praktického pohledu považujeme za podstatně důležitější závislosti na rychlosti než na frekvenci otáčení, prezentujeme zde jen tyto výsledky.

Řada pokusů ukázala, že jako nejvhodnější empirický model pro závislost směrodatné odchylky rychlosti (resp. standardní absolutní nejistoty) s na rychlosti v se stejně jako v případě závislosti na specifických otáčkách jeví model

$$s = y_0 + ae^{-bv} + cv$$

kde y_0 , a , b a c jsou empirické koeficienty.

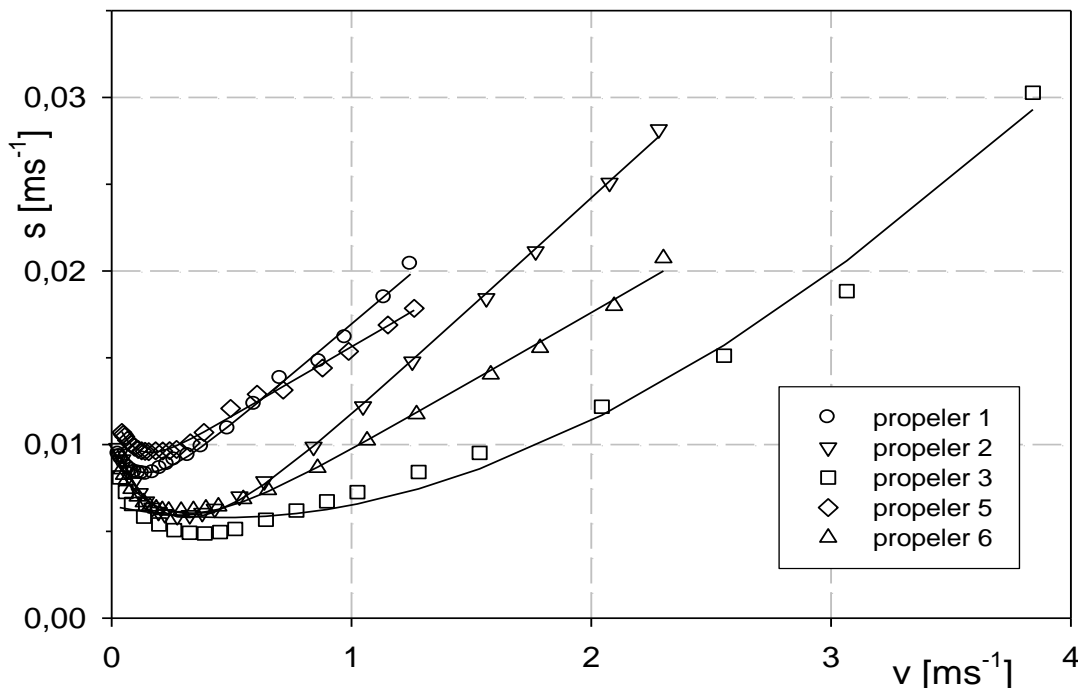
Pro závislost součinitele variace (resp. standardní relativní nejistoty) u na rychlosti v se zdá nejlépe vyhovovat racionální polynom

$$u = y_0 + \frac{a}{v} + \frac{b}{v^2}.$$

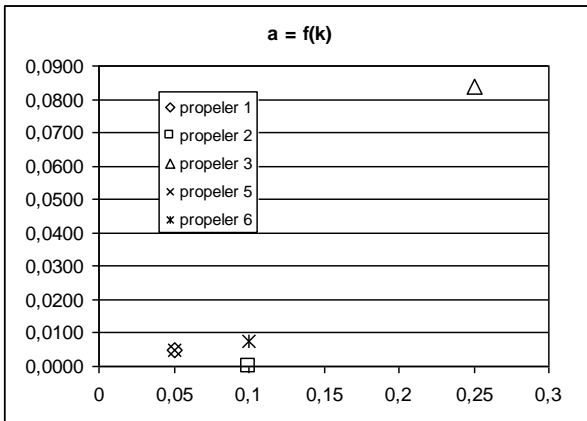
kde y_0 , a a b jsou empirické konstanty.

Pro model $s = f(v)$ je poněkud problematický propeler č. 3, kde empirický model nevystihuje příliš dobře průběh dat pro menší rychlosti (viz obr. 6), i když analýza variance potvrzuje jeho významnost, a to i přes to, že hodnoty jednotlivých empirických konstant modelu jsou značně pochybné (viz tab. 4 – hodnoty Studentova t a pravděpodobnosti P). Opět pro všechny propelery jsou poměrně značně vysoké hodnoty součinitele determinace - R^2 se pohybuje v rozmezí $R^2 = 0,979 - 0,999$. Z vyhodnocení empirických konstant modelů pro jednotlivé propelery je patrné, že rozdíly hodnot koeficientů pro dané stoupání propeleru jsou dosti značné (viz obr 6 – 9).

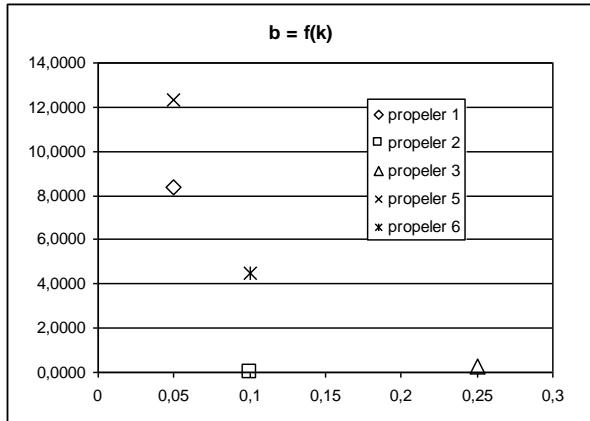
C2 - abs. std. nejistota $s=f(v)$ - vyrovnání



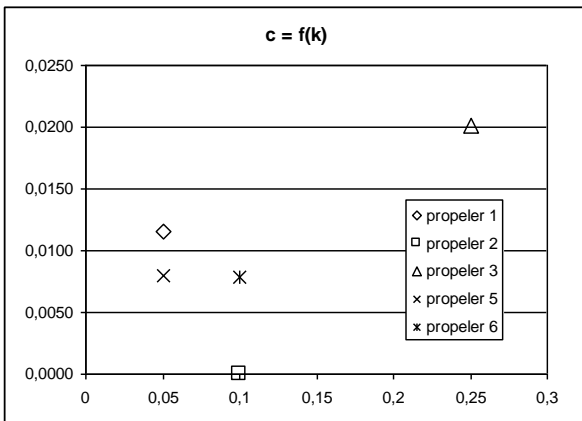
Obr. 6 Vyrovnání dat empirickým modelem $s = f(v)$



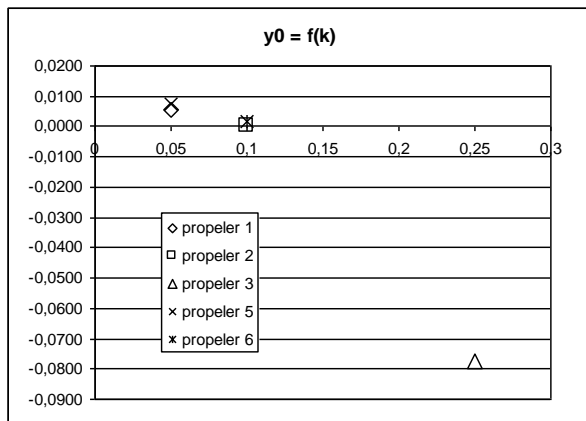
Obr. 7 $a = f(k)$



Obr. 8 $b = f(k)$



Obr. 9 $c = f(k)$



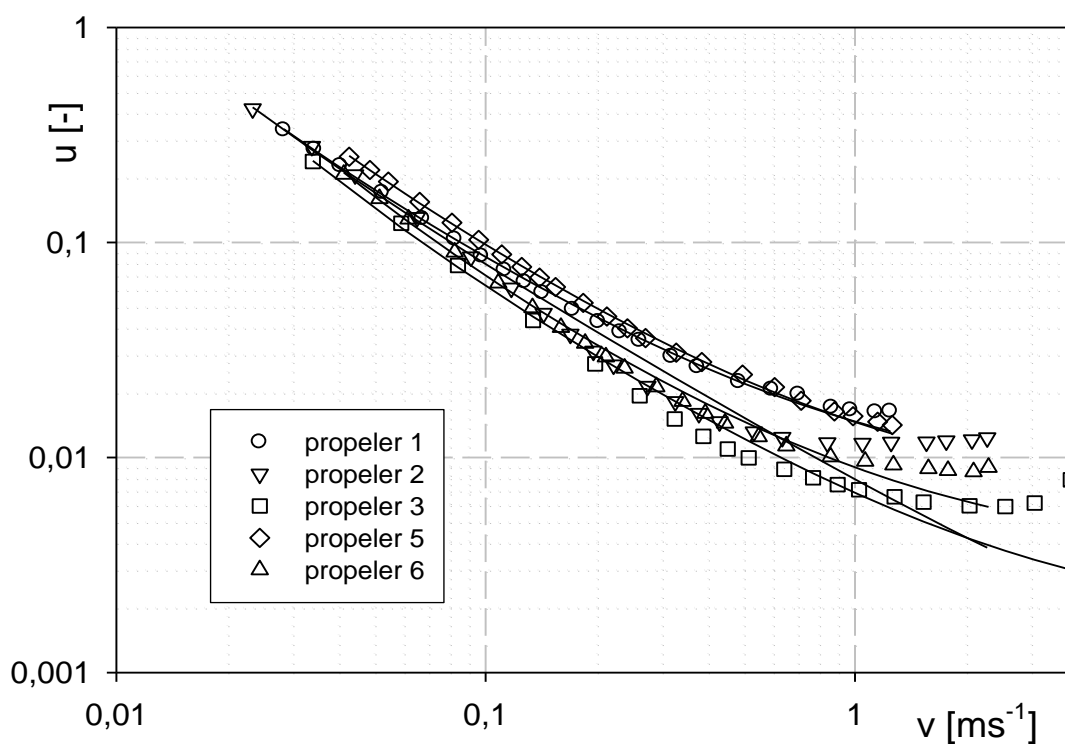
Obr. 10 $y_0 = f(k)$

Tabulka 5

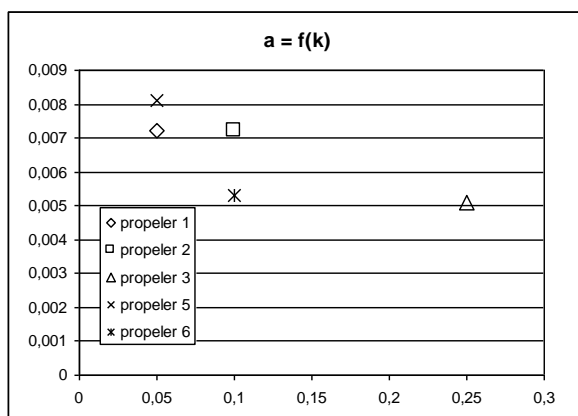
Parametry empirického modelu $u = f(v)$

	Model					Regrese			ANOVA					
	koef.	value	std. error	t	P	R	Rsqr	Adj Rsqr		DF	SS	MS	F	P
prop 1	y0	7,44E-03	8,96E-04	8,3118	<0,0001	0,9997	0,9994	0,9993	Regression	2	0,1717	0,0859	15772,436	<0,0001
0,05	a	7,21E-03	1,79E-04	40,2561	<0,0001				Residual	20	0,0001	0		
	b	6,11E-05	5,46E-06	11,1972	<0,0001				Total	22	0,1719	0,0078		
prop 2	y0	6,18E-04	2,15E-03	0,2882	0,7762	0,9980	0,9961	0,9957	Regression	2	0,2327	0,1163	2540,758	<0,0001
0,1	a	7,25E-03	4,40E-04	16,4726	<0,0001				Residual	20	0,0009	0		
	b	6,32E-05	1,13E-05	5,5842	<0,0001				Total	22	0,2336	0,0106		
prop 3	y0	1,68E-03	9,06E-04	1,8497	0,0818	0,9989	0,9979	0,9976	Regression	2	0,0608	0,0304	3949,756	<0,0001
0,25	a	5,08E-03	2,89E-04	17,5906	<0,0001				Residual	17	0,0001	0		
	b	1,03E-04	1,05E-05	9,8029	<0,0001				Total	19	0,0609	0,0032		
prop 5	y0	6,43E-03	6,09E-04	10,5623	<0,0001	0,9998	0,9996	0,9996	Regression	2	0,1058	0,0529	26773,671	<0,0001
0,05	a	8,09E-03	1,61E-04	50,2013	<0,0001				Residual	20	0	0		
	b	1,04E-04	7,18E-06	14,5405	<0,0001				Total	22	0,1058	0,0048		
prop 6	y0	3,57E-03	8,32E-04	4,2937	0,0004	0,9992	0,9984	0,9982	Regression	2	0,0639	0,032	6101,807	<0,0001
0,1	a	5,29E-03	2,55E-04	20,7608	<0,0001				Residual	20	0,0001	0		
	b	1,36E-04	1,14E-05	11,9045	<0,0001				Total	22	0,064	0,0029		

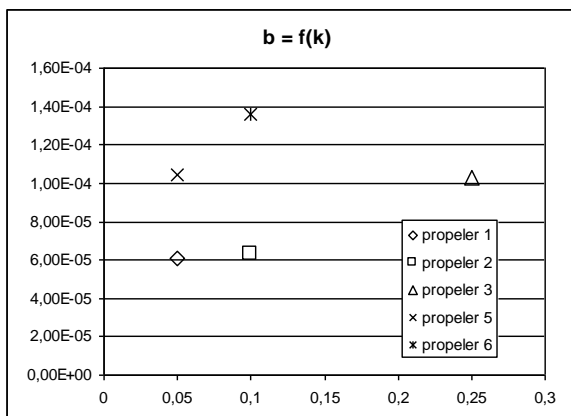
C2 - relat.std. nejistota $u=f(v)$ - vyrovnání



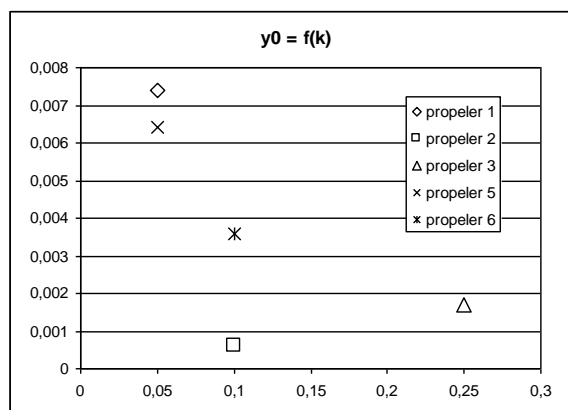
Obr. 11 Vyrovnání dat empirickým modelem $u = f(v)$



Obr. 12 $a = f(k)$



Obr. 13 $b = f(k)$



Obr. 14 $y_0 = f(k)$

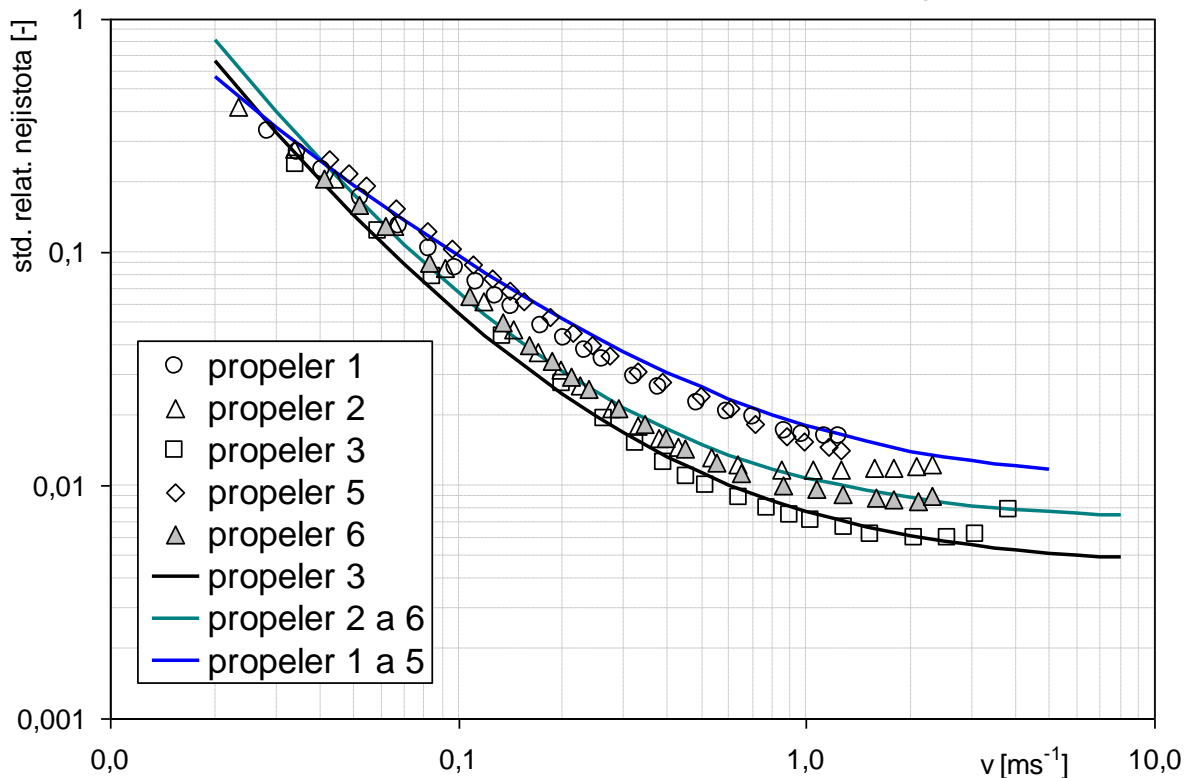
Značně lépe vypadají výsledky pro model závislosti součinitele variace na rychlosti $u = f(v)$ - viz tab. 5 a obr. 11 – 14. Empirické modely pro všechny propelery vystihují data velmi dobře, odhady hodnoty empirických konstant modelů jsou s výjimkou dvou případů pro propeler č. 2 a 3 – v obou případech se jedná o nejvíce problematickou konstantu y_0 – významné (viz tabulka 5 - hodnoty Studentova t a pravděpodobnosti P). Analýza variance potvrzuje celkovou platnost modelů pro všechny typy propelerů. Regresní vztah mezi proměnnými je velmi těsný, součinitel determinace R^2 se pohybuje v rozmezí $R^2 = 0,996 - 0,999$.

Modely velmi dobře charakterizují spíše nižší rychlosti, pro rychlosti větší než zhruba 1 ms^{-1} většinou nejistoty poněkud podhodnocují. Pro propelery s nejmenším stoupáním (propelery 1 a 5) je model velmi výstižný v celém rozsahu dat. Pro propelery 2 a 5 lze hodnoty součinitele variace považovat za prakticky konstantní pro rychlosti $v > \text{ca } 0,7 - 0,8 \text{ ms}^{-1}$, pro propeler 3 od ca 1 ms^{-1} .

Z hlediska praktického stanovení odhadu standardních relativních nejistot náhodné složky kalibrace se nám zdá být nejvhodnější horní obalová křivka dat, která v podstatě udává maximální hodnoty nejistoty. Na první pohled je z obr. 5 a 11 patrné, že obalová křivka se bude blížit křivkám pro propelery 1 a 5, které mají pro danou rychlost nejvyšší hodnoty nejistoty. Další křivka by byla třeba pro propelery 2 a 6 a třetí pro propeler 3. Metodou pokusů a omylů byly vyhovující křivky s dostatečně jednoduchými koeficienty nalezeny, lze je popsat rovnicemi:

$$u = 1 \cdot E-2 + \frac{8 \cdot E-3}{v} + \frac{6 \cdot E-5}{v^2} \text{ pro propeler 1 a 5}$$

C-2 - doporučená standardní relativní nejistota



Obr 15 Doporučená standardní relativní nejistota $u=f(v)$

$$u = 7 \cdot E-3 + \frac{3,5 \cdot E-3}{v} + \frac{2,5 \cdot E-4}{v^2} \text{ pro propeler 2 a 6}$$

$$u = 4,5 \cdot E-3 + \frac{3 \cdot E-3}{v} + \frac{2 \cdot E-4}{v^2} \text{ pro propeler 3}$$

a je vykreslena spolu s daty na obr. 15.

Obrázek 15 může být použit pro odhad standardní relativní nejistoty náhodné složky kalibrace podle ČSN EN ISO 748 při měření průtoků vrtulemi typu Ott C-2.

Zde je vhodné poznamenat, že jen málo vrtulí reaguje na proudění při rychlostech menších než ca 0,05 – 0,07 ms⁻¹, takže vcelku tragicky vypadající počátek křivky s nejistotami 20 a více procent lze do značné míry zanedbat. Pro zpravidla již dobře měřitelnou rychlost 0,10 ms⁻¹ je relativní standardní nejistota náhodné složky kalibrace ca 10 % a jak je z obrázku patrné, dosti rychle klesá a při rychlosti 0,20 ms⁻¹ již dosahuje jen 5 – 6 %, pro rychlost 0,50 ms⁻¹ pak jen ca 2,5 %.

4. Vrtule Ott C-31

Jak ukazuje přehled dostupných (archivních) dat pro vrtule typu Ott C-31 v tabulce 2, pohybují se počty kalibrací pro jednotlivé propelery a upevnění vrtulí od jednotek po sta. Počty kalibrací mimo jiné také poněkud vypovídají o intenzitě využívání jednotlivých kombinací propelerů a upevnění vrtulí. Ukázalo se, že původní odhad náplně úkolu prezentovaný v rámci úvodního oponentního řízení (Ott C-31 s propelery 1, 2, 4 a R s upevněním na tyči a na laně se závažím 10 a 25 kg) bylo třeba poněkud rozšířit. Na základě závěrů průběžného oponentního řízení bylo též rozhodnuto doplnit data novými kalibracemi vrtule Ott C-31 s propelerem A v upevnění na tyči. Data pak byla dostatečná pro zpracování následujících vrtulí (tedy kombinace tělo Ott C-31 + propeler + upevnění):

- propeler 1: na tyči, se závažím 10, 25, 50 a 100 kg
- propeler 2: na tyči, se závažím 25 a 50 kg
- propeler 4: na tyči, se závažím 5, 10 a 25 kg
- propeler R: na tyči (pro závaží nejsou data)
- propeler A: na tyči (data doplněna novými kalibracemi)
- propeler F: na tyči

Stejně jako v případě vrtulí Ott C-2 jsme nejprve vynesli do grafů pro jednotlivé propelery a typy upevnění všechna existující data, zpracovali histogramy, krabicové a pravděpodobnostní grafy (jejich příklady již ve zprávě neuvádíme) a na jejich základě vyloučili případy dávající odlehle hodnoty. Po očištění dat jsme pak provedli výsledné zpracování, jehož výsledky uvádíme. Obdobně jako pro vrtule Ott C-2 i pro vrtule Ott C-31 jsou ve zprávě uvedeny jenom přímo prakticky využitelné závislosti standardní absolutní nejistoty $s = f(v)$ a standardní relativní nejistoty $u = f(v)$. Stejně jako v případě vrtulí Ott C-2 jsme se pokusili nalézt vhodné empirické modely jak pro závislost standardní absolutní nejistoty na rychlosti, tak i závislost standardní relativní nejistoty na rychlosti. Ukázalo se, že tvar modelů použitých pro vrtule Ott C-2 poměrně dobře vyhovuje i pro vrtule Ott C-31. Protože však modely pro závislost standardní absolutní nejistoty na rychlosti nemají rozumného praktického využití, uvádíme zde jen modely standardní relativní nejistoty $u = f(v)$.

4.1 Vrtule Ott C-31 s propelerem 1

Pro propeler typu 1 jsme měli k dispozici dostatečná data pro zpracování vrtule v upevnění na tyči a se závažími hmotnosti 5, 10, 25, 50 a 100kg, byť počty případů pro jednotlivé typy upevnění se dosti lišily.

Závislosti standardní absolutní nejistoty i standardní relativní nejistoty jsou pro vrtuli s tímto propelerem a všechny typy uchycení uvedeny na obr. 16 a 17. Pro nejvyšší rychlosti nebyl v řadě případů dostatek kalibračních bodů, takže data jsou sice vynesena, ale oblast jejich pochybných hodnot je v grafech označena.

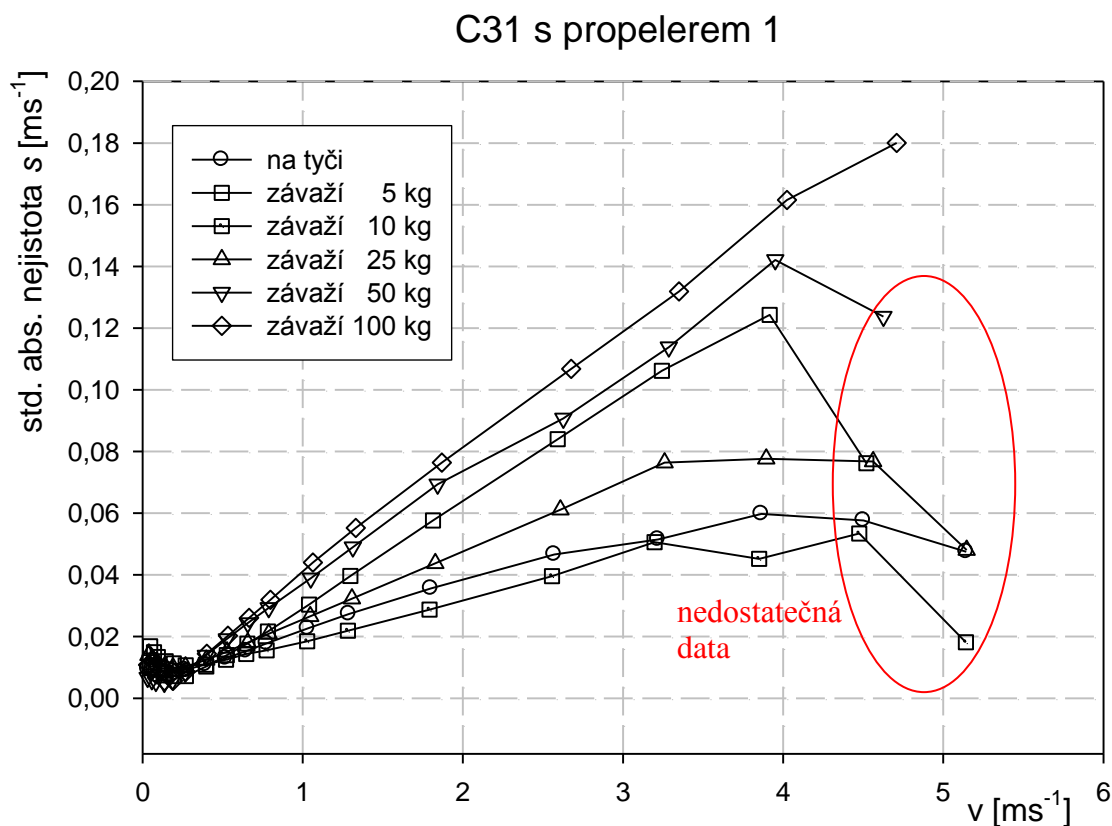
V grafu na obr. 17 jsou kromě závislosti standardní relativní nejistoty uvedeny i hodnoty udávané ISO 748 v tab. E5 v příloze normy. Opět je zřejmé, že ISO udává hodnoty ca poloviční než jsou hodnoty reálné. Při porovnání je třeba vzít v úvahu, že ISO udává nejistoty rozšířené (s pokrytím 95 %), zatímco námi určené hodnoty jsou nejistoty standardní.

Pro závislost součinitele variace (resp. standardní relativní nejistoty) u na rychlosti v se zdá nejlépe vyhovovat racionální polynom

$$u = y_0 + \frac{a}{v} + \frac{b}{v^2}.$$

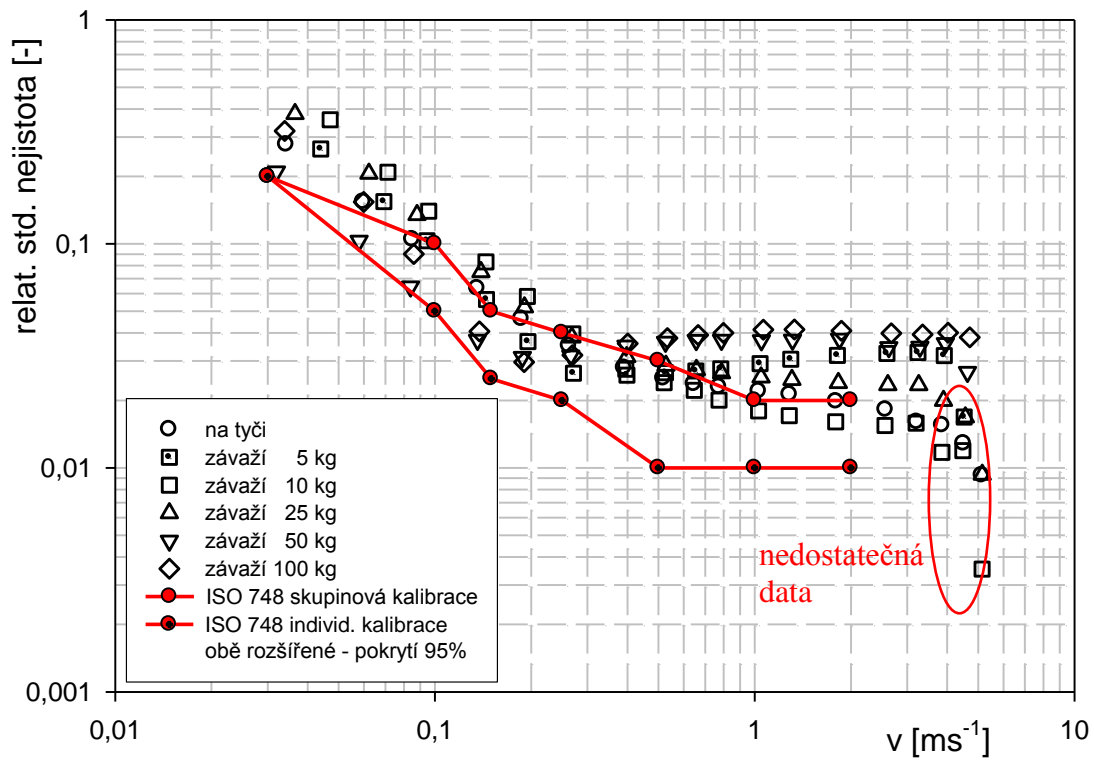
kde y_0 , a a b jsou empirické konstanty.

Výsledky výpočtů jsou uvedeny v tab.6 a na obr. 18.



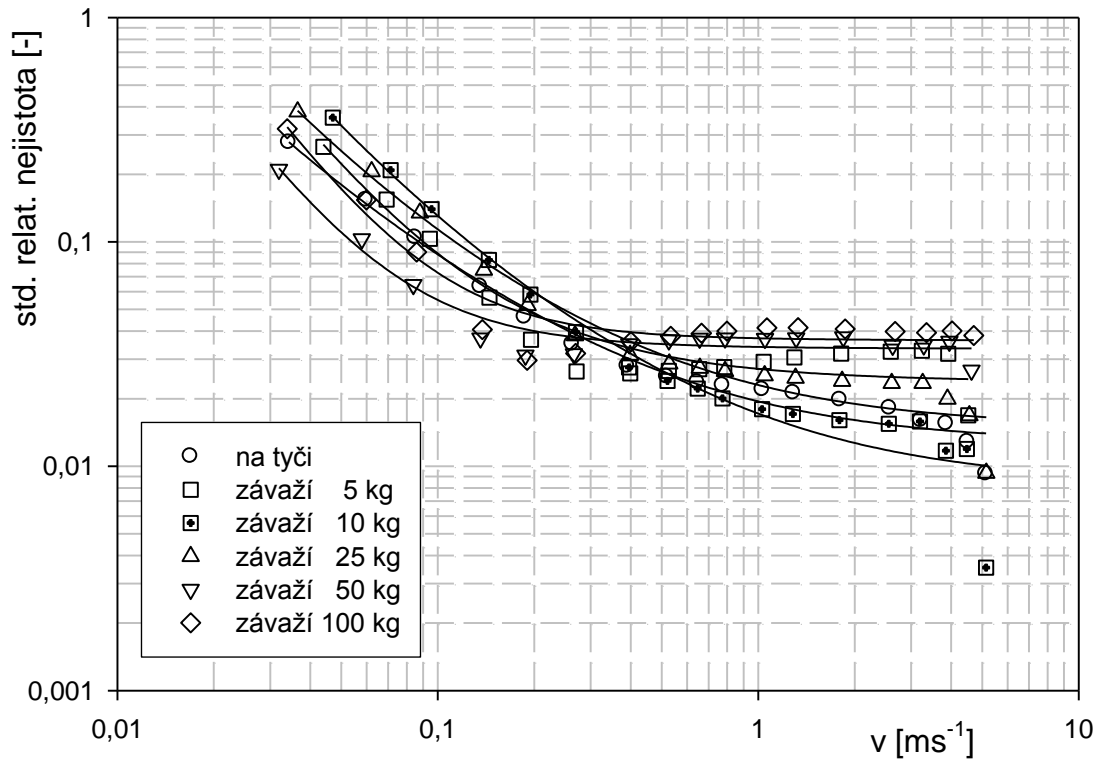
Obr. 16 Vrtule C-31 s propelerem 1 – standardní absolutní nejistota $s = f(v)$

C31 s propelerem 1



Obr. 17 Vrtule C-31 s propelerem 1 – standardní relativní nejistota $u = f(v)$

C-31 s propelerem 1 - empirické modely



Obr. 18 Empirické modely pro propeler 1 a různé typy upevnění

Tabulka 6

Parametry empirických modelů $u = f(v)$ pro propeler 1

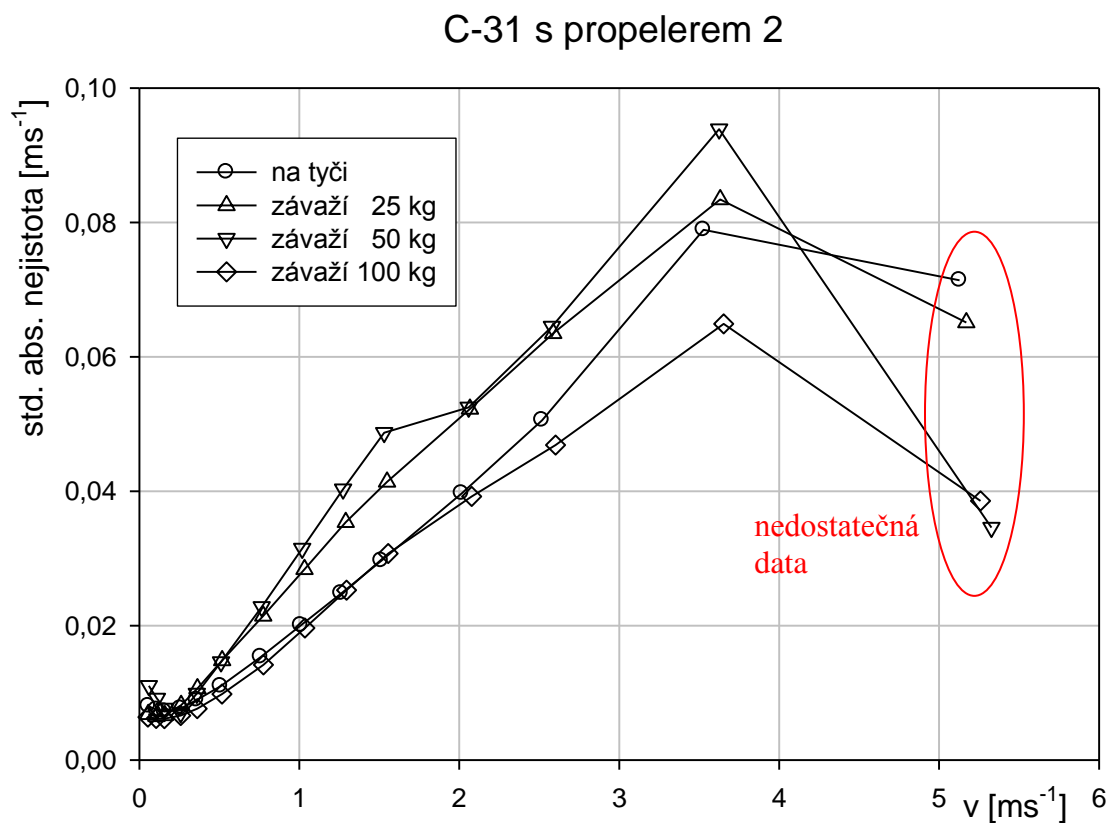
	Model					Regrese			ANOVA					
	koef.	value	std. error	t	P	R	Rsqr	Adj Rsqr		DF	SS	MS	F	P
na tyči	y0	1,27E-02	1,07E-03	11,8746	<0,0001	0,9990	0,9979	0,9976	Regression	2	0,0769	0,0384	3608,757	<0,0001
	a	6,68E-03	3,35E-04	19,974	<0,0001				Residual	15	0,0002	0		
	b	8,35E-05	1,24E-05	6,7599	<0,0001				Total	17	0,0770	0,0045		
5 kg	y0	2,38E-02	3,09E-03	7,7010	<0,0001	0,9921	0,9843	0,9821	Regression	2	0,0646	0,0323	438,8178	<0,0001
	a	3,06E-03	1,12E-03	2,7197	0,0166				Residual	14	0,0010	0,0001		
	b	3,44E-04	5,33E-05	6,4661	<0,0001				Total	16	0,0656	0,0041		
10 kg	y0	8,42E-03	1,34E-03	6,2895	<0,0001	0,9992	0,9984	0,9982	Regression	2	0,1408	0,0704	4685,141	<0,0001
	a	8,38E-03	5,28E-04	15,8528	<0,0001				Residual	15	0,0002	0		
	b	3,85E-04	2,71E-05	14,2223	<0,0001				Total	17	0,1411	0,0083		
25 kg	y0	1,50E-02	2,05E-03	7,3285	<0,0001	0,9980	0,9961	0,9955	Regression	2	0,1459	0,0729	1891,566	<0,0001
	a	7,80E-03	6,73E-04	11,5864	<0,0001				Residual	15	0,0006	0		
	b	2,08E-04	2,65E-05	7,8183	<0,0001				Total	17	0,1464	0,0086		
50 kg		3,34E-02	1,93E-03	17,3314	<0,0001	0,9930	0,9860	9840	Regression	2	0,0315	0,0157	492,3868	<0,0001
		4,98E-04	5,57E-04	0,8945	0,3862				Residual	14	0,0004	0		
		1,67E-04	1,89E-05	8,8285	<0,0001				Total	16	0,0319	0,0020		
100 kg	y0	3,64E-02	3,34E-03	10,9037	<0,0001	0,9920	0,9841	0,9818	Regression	2	0,0819	0,0409	432,0612	<0,0001
	a	4,96E-04	1,01E-03	0,4917	0,6306				Residual	14	0,0013	0,0001		
	b	3,15E-04	3,66E-05	8,6190	<0,0001				Total	16	0,0832	0,0052		

Jak z obr. 18, tak z tab. 6 je patrné, že v některých případech není model zcela vyhovující – zde se jedná o závaží hmotnosti 5 kg, a zejména 50 a 100 kg, jejichž standardní relativní nejistoty zřejmě mají při rychlosti ca $0,2 - 0,3 \text{ ms}^{-1}$ lokální minimum, které zvolený typ modelu není schopen postihnout. To se projevuje i v hodnotách uvedených v tab. 6 pro konstantu a , jejíž chyba je větší než její hodnota, Studentovo t je nízké a hodnota P je vysoká. Analýza variance však potvrzuje celkovou přijatelnost modelu, byť hodnoty F -testu nejsou příliš vysoké.

4.2 Vrtule Ott C-31 s propelerem 2

Pro propeler typu 2 jsme měli k dispozici dostatečná data pro zpracování vrtule v upevnění na tyči a se závažími hmotnosti 25, 50 a 100kg, byť počty případů pro jednotlivé typy upevnění se dosti lišily.

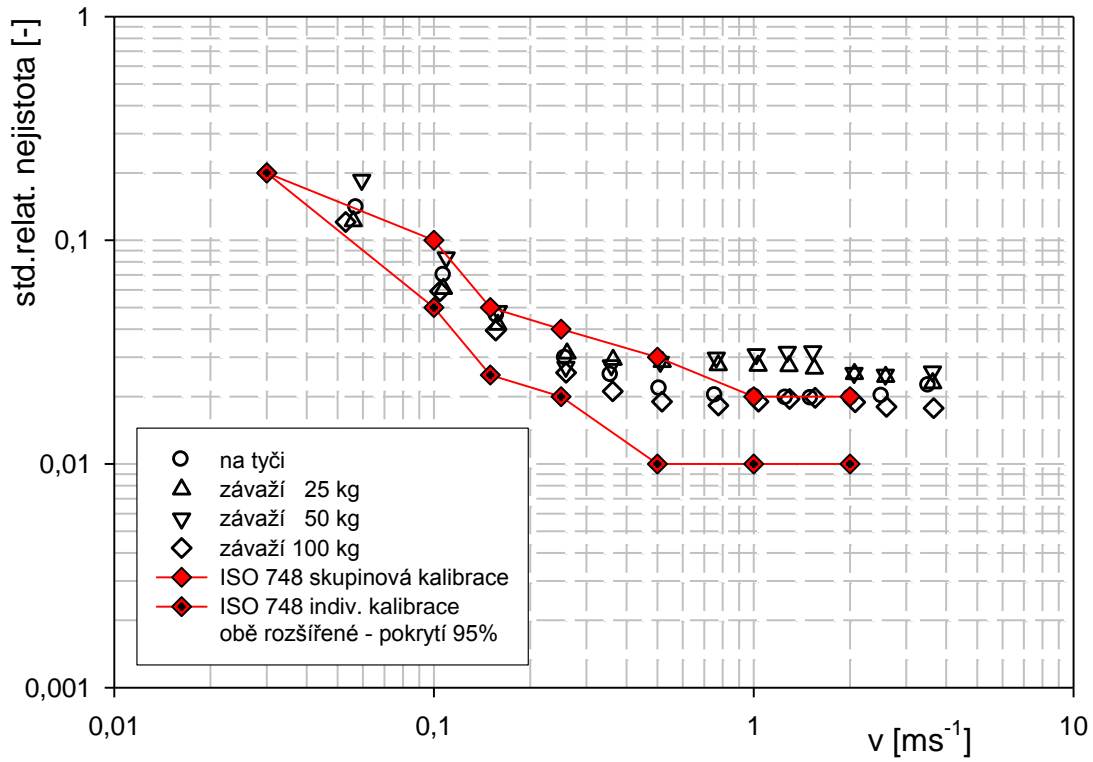
Závislosti standardní absolutní nejistoty i standardní relativní nejistoty jsou pro vrtuli s tímto propelerem a všechny typy uchycení uvedeny na obr. 19 a 20. Pro nejvyšší rychlosti nebyl v řadě případů dostatek kalibračních bodů, takže data jsou sice v obr. 19 vynesena, ale oblast jejich pochybných hodnot je v grafu označena.



Obr. 19 Vrtule C-31 s propelerem 2 – standardní absolutní nejistota $s = f(v)$

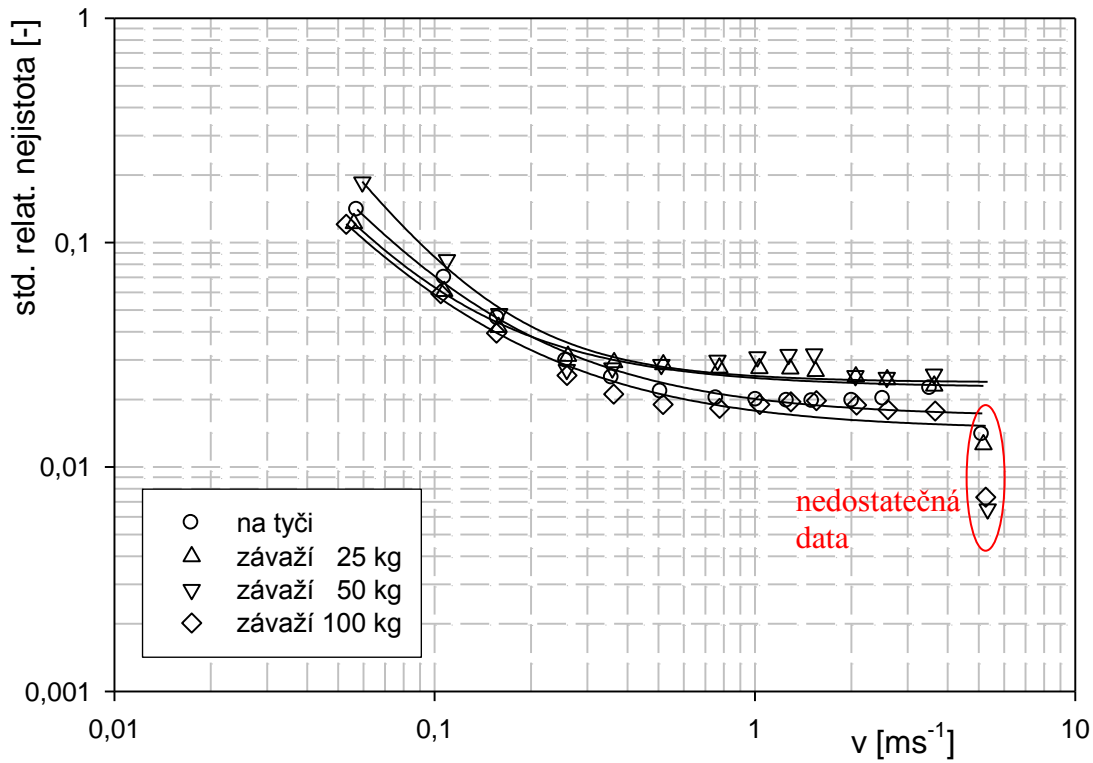
V grafu na obr. 20 jsou kromě závislosti standardní relativní nejistoty uvedeny i hodnoty udávané ISO 748 v tab. E5 v příloze normy. Stejně jako v předchozích případech ISO udává hodnoty ca poloviční než jsou hodnoty reálné. Při porovnání je třeba vzít v úvahu, že ISO

C31 s propelerem 2



Obr. 20 Vrtule C-31 s propelerem 2 – standardní relativní nejistota $u = f(v)$

C-31 s propelerem 2 - empirické modely



Obr. 21 Empirické modely pro propeler 2 a různé typy upevnění

Tabulka 7

Parametry empirických modelů $u = f(v)$ pro propeler 2

	Model					Regrese			ANOVA					
	koef.	value	std. error	t	P	R	Rsqr	Adj Rsqr		DF	SS	MS	F	P
na tyči	y0	1,67E-02	1,07E-03	15,6509	<0,0001	0,9974	0,9948	0,9938	Regression	2	0,0145	0,0073	1050,264	<0,0001
	a	3,18E-03	5,06E-04	6,2804	<0,0001				Residual	11	0,0001	0		
	b	2,24E-04	3,00E-05	7,4886	<0,0001				Total	13	0,0146	0,0011		
25 kg	y0	2,26E-02	1,50E-03	15,0668	<0,0001	0,9919	0,9838	0,9809	Regression	2	0,0093	0,0046	334,5972	<0,0001
	a	2,16E-03	7,04E-04	3,0682	0,0107				Residual	11	0,0002	0		
	b	1,90E-04	4,07E-05	4,6791	0,0007				Total	13	0,0094	0,0007		
50 kg	y0	2,37E-02	3,00E-03	7,9186	<0,0001	0,9884	0,9768	0,9726	Regression	2	0,025	0,0125	231,9575	<0,0001
	a	1,20E-03	1,46E-03	0,8221	0,4285				Residual	11	0,0006	0,0001		
	b	5,06E-04	8,98E-05	5,6309	0,0002				Total	13	0,0256	0,002		
100 kg	y0	1,47E-02	1,35E-03	10,8422	<0,0001	0,9941	0,9882	0,9861	Regression	2	0,0106	0,0053	460,6609	<0,0001
	a	3,00E-03	6,14E-04	4,8898	0,0005				Residual	11	0,0001	0		
	b	1,39E-04	3,35E-05	4,1584	0,0016				Total	13	0,0108	0,0008		

udává nejistoty rozšířené (s pokrytím 95 %), zatímco námi určené hodnoty jsou nejistoty standardní.

Pro závislost součinitele variace (resp. standardní relativní nejistoty) u na rychlosti v se opět zdá nejlépe vyhovovat racionální polynom

$$u = y_0 + \frac{a}{v} + \frac{b}{v^2}.$$

kde y_0 , a a b jsou empirické konstanty.

Výsledky výpočtů empirických konstant modelů jsou uvedeny v tab.7 a na obr. 21.

Jak z obr. 21, tak z tab. 7 je patrné, že pro závaží 50 kg není vystižení průběhu dat zcela optimální. To se projevuje v hodnotách pro konstantu a v tab. 6; chyba je větší než její hodnota, Studentovo t je nízké a hodnota P je vysoká. Analýza variance však potvrzuje celkovou přijatelnost modelu, byť hodnoty F -testu nejsou příliš vysoké. Pro závaží 25 a 100 kg jsou hodnoty Studentova t i pravděpodobnosti P pro konstanty a i b ještě přijatelné.

4.3 Vrtule Ott C-31 s propelerem 4

Pro propeler typu 1 jsme měli k dispozici dostatečná data pro zpracování vrtule v upevnění na tyči a se závažími hmotnosti 5, 10 a 25 kg, byť počty případů pro jednotlivé typy upevnění se dosti lišily.

Závislosti standardní absolutní nejistoty i standardní relativní nejistoty jsou pro vrtuli s tímto propelerem a všechny typy uchycení uvedeny na obr. 22 a 23.

Poněkud nečekaný je průběh dat pro vysoké rychlosti na obr. 22. Pro nejvyšší rychlosti byl většinou ca poloviční počet kalibračních bodů, který by však podle našeho názoru měl, vzhledem k jejich poměrně vysokému počtu, být dostatečný pro rozumný odhad hodnoty nejistoty. Také data pro závaží 10 a 25 kg se chovají v zásadě podle předpokladu, takže pro výrazný pokles hodnoty nejistoty v předposledním bodu pro upevnění na tyči a závaží 5 kg nemáme rozumné vysvětlení.

V grafu na obr. 20 jsou kromě závislosti standardní relativní nejistoty uvedeny i hodnoty udávané ISO 748 v tab. E5 v příloze normy. Stejně jako v předchozích případech ISO udává hodnoty ca poloviční než jsou hodnoty reálné. Při porovnání je třeba vzít v úvahu, že ISO udává nejistoty rozšířené (s pokrytím 95 %), zatímco námi určené hodnoty jsou nejistoty standardní.

Pro závislost součinitele variace (resp. standardní relativní nejistoty) u na rychlosti v se opět zdá nejlépe vyhovovat racionální polynom

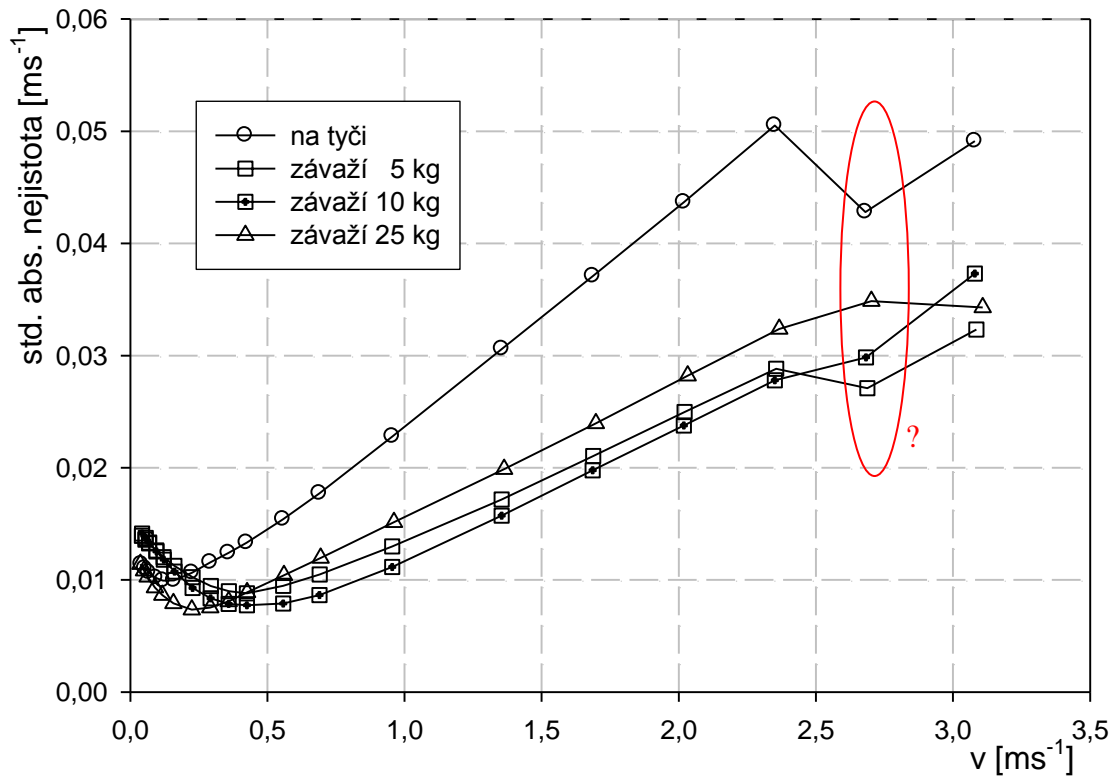
$$u = y_0 + \frac{a}{v} + \frac{b}{v^2}.$$

kde y_0 , a a b jsou empirické konstanty.

Výsledky výpočtů empirických konstant modelů jsou uvedeny v tab.8 a na obr. 24.

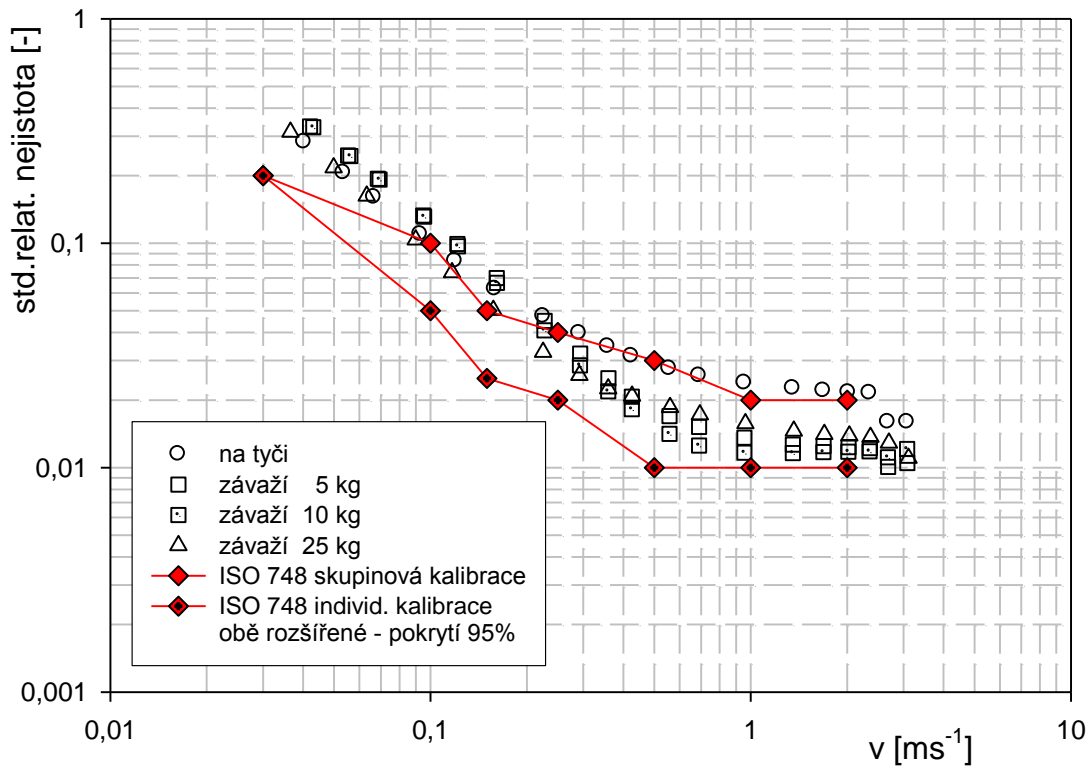
Jak z obrázku, tak tabulky je vidět, že v případě vrtule se závažími 5 a 10 kg modely realitu příliš nevystihují (viz hodnoty Studentova t a pravděpodobnosti P pro konstanty y_0) i přesto, že analýza variance jejich významnost jednoznačně potvrzuje. Poněkud lépe vypadá proklad pro vrtuli se závažími 25 kg a pro upevnění na tyči je model vcelku adekvátní.

C-31 s propelerem 4



Obr. 22 Vrtule C-31 s propelerem 4 – standardní absolutní nejistota $s = f(v)$

C31 s propelerem 4



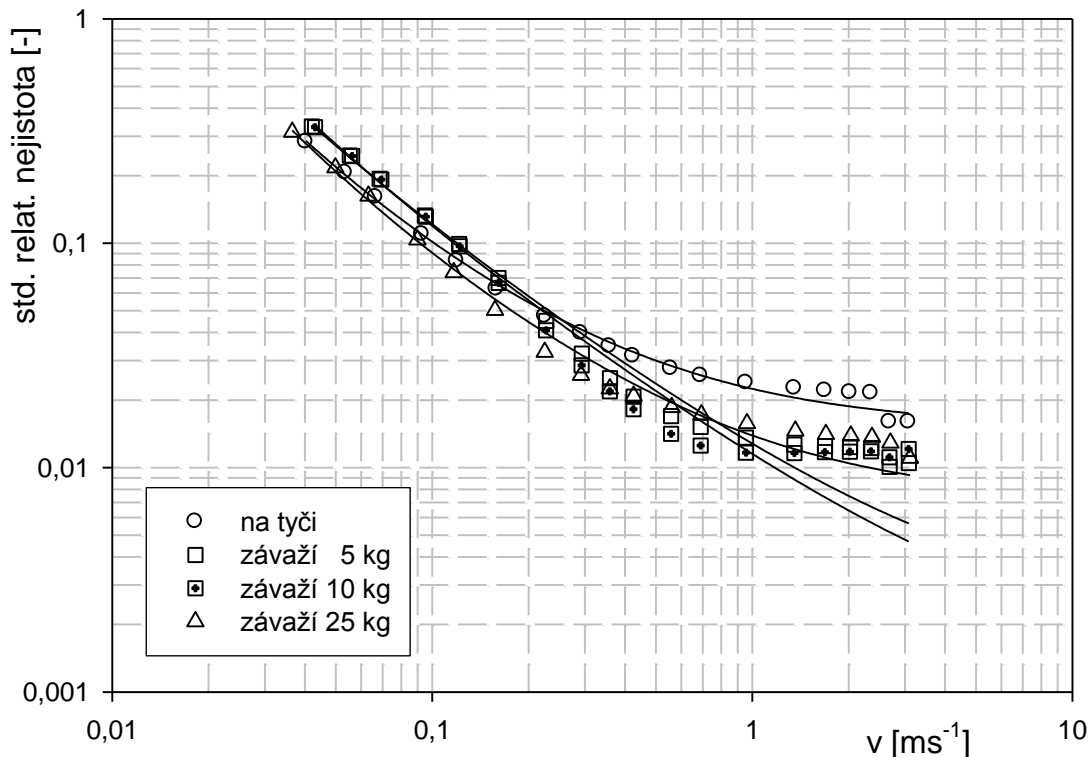
Obr. 23 Vrtule C-31 s propelerem 4 – standardní relativní nejistota $u = f(v)$

Tabulka 8

Parametry empirických modelů $u = f(v)$ pro propeler 4

	Model					Regrese			ANOVA					
	koef.	value	std. error	t	P	R	Rsqr	Adj Rsqr		DF	SS	MS	F	P
na tyči	y0	1,52E-02	9,47E-04	16,0402	<0,0001	0,9994	0,9989	0,9987	Regression	2	0,0983	0,0491	7064,16	<0,0001
	a	7,10E-03	2,99E-04	23,7657	<0,0001				Residual	16	0,0001	0		
	b	1,53E-04	1,32E-05	11,5932	<0,0001				Total	18	0,0984	0,0055		
5 kg	y0	2,25E-03	1,93E-03	1,1661	0,2607	0,9985	0,9971	0,9967	Regression	2	0,1548	0,0774	2728,578	<0,0001
	a	1,04E-02	6,30E-04	16,5129	<0,0001				Residual	16	0,0005	0		
	b	1,54E-04	2,90E-05	5,3196	<0,0001				Total	18	0,1553	0,0086		
10 kg	y0	1,46E-03	2,39E-03	0,6123	0,5489	0,9978	0,9955	0,9950	Regression	2	0,1538	0,0769	1788,131	<0,0001
	a	9,87E-03	7,93E-04	12,4355	<0,0001				Residual	16	0,0007	0		
	b	1,94E-04	3,74E-05	5,1919	<0,0001				Total	18	0,1545	0,0086		
25 kg	y0	7,11E-03	1,67E-03	4,2701	0,0006	0,9986	0,9971	0,9967	Regression	2	0,1244	0,0622	2759,89	<0,0001
	a	6,63E-03	4,88E-04	13,5868	<0,0001				Residual	16	0,0004	0		
	b	1,73E-04	1,96E-05	8,8347	<0,0001				Total	18	0,1247	0,0069		

C-31 s propelerem 4 - empirické modely



Obr. 24 Empirické modely pro propeler 4 a různé typy upevnění

4.4 Vrtule Ott C-31 s propelery R, A a F

Pro propelery typů R, A a F jsme měli k dispozici dostatečná data pouze pro zpracování vrtule v upevnění na tyči.

Závislosti standardní absolutní nejistoty i standardní relativní nejistoty jsou pro vrtuli s tímto propelerem a všechny typy uchycení uvedeny na obr. 25 a 26.

Z obr. 25 je patrné, že propeler A má v celém rozsahu rychlostí podstatně menší absolutní nejistotu než ostatní v této kapitole zkoumané propelery. Ještě více tento rozdíl vyniká pro standardní relativní nejistotu – viz obr. 26.

V grafu na obr. 26 jsou kromě závislosti standardní relativní nejistoty uvedeny i hodnoty udávané ISO 748 v tab. E5 v příloze normy. Stejně jako v předchozích případech ISO udává hodnoty ca poloviční než jsou hodnoty reálné. Při porovnání je třeba vzít v úvahu, že ISO udává nejistoty rozšířené (s pokrytím 95 %), zatímco námi určené hodnoty jsou nejistoty standardní.

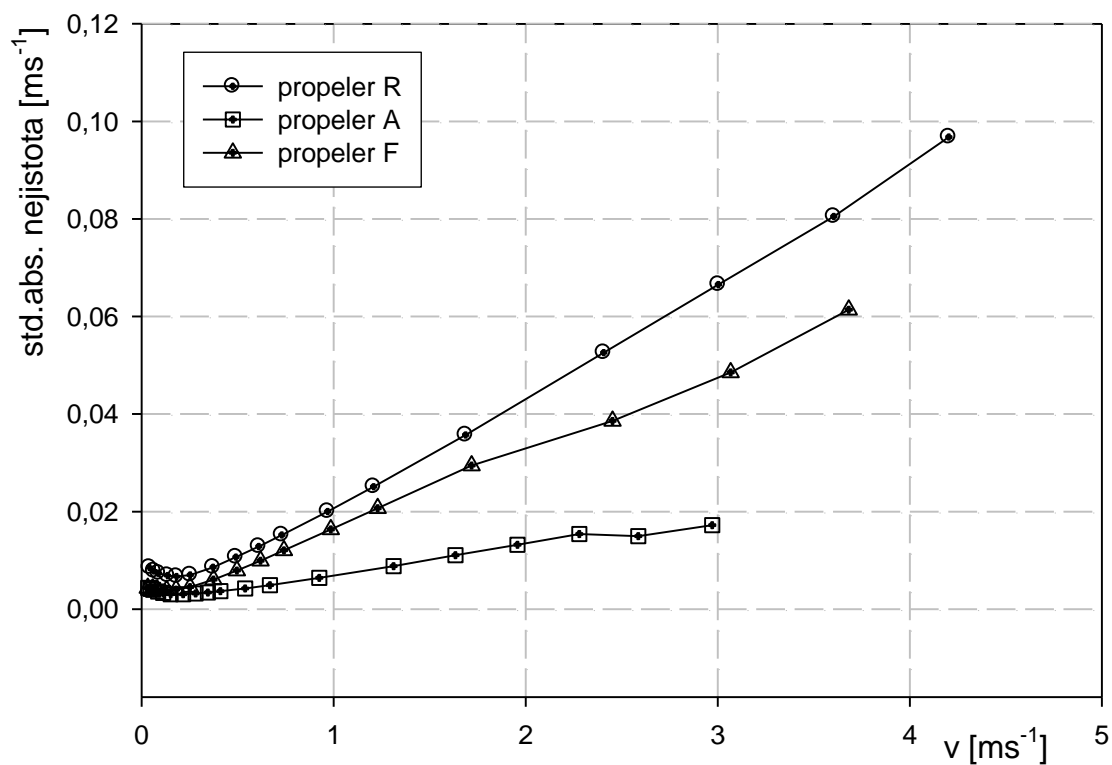
Pro závislost součinitele variace (resp. standardní relativní nejistoty) u na rychlosti v se opět zdá nejlépe vyhovovat racionální polynom

$$u = y_0 + \frac{a}{v} + \frac{b}{v^2}.$$

kde y_0 , a a b jsou empirické konstanty.

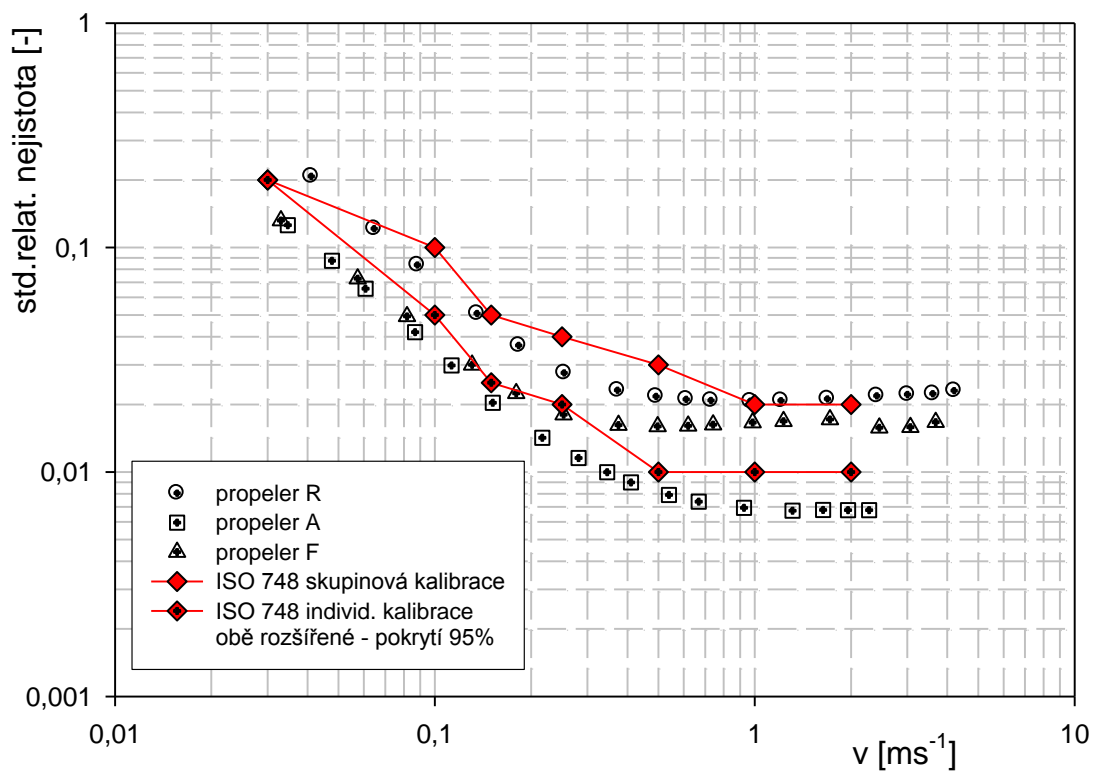
Výsledky výpočtů empirických konstant modelů jsou uvedeny v tab.9 a na obr. 27.

C-31 s propelery R, A a F



Obr. 25 Vrtule C-31 s propelery R, A a F – standardní absolutní nejistota $s = f(v)$

C31 s propelery R, A, F



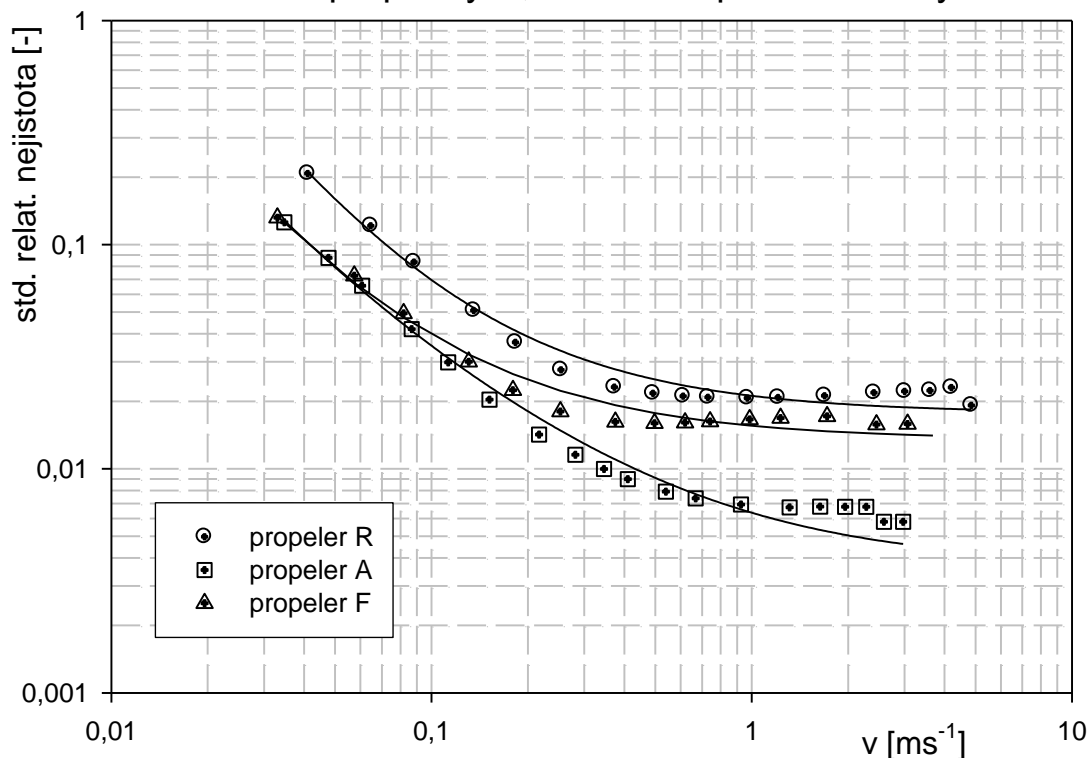
Obr. 26 Vrtule C-31 s propelery R, A a F – standardní relativní nejistota $u = f(v)$

Tabulka 8

Parametry empirických modelů $u = f(v)$ pro propelery R, A a F

propeler	Model					Regrese			ANOVA					
	koef.	value	std. error	t	P	R	Rsqr	Adj Rsqr		DF	SS	MS	F	P
R	y0	1,77E-02	1,36E-03	13,0515	<0,0001	0,9971	0,9942	0,9934	Regression	2	0,0406	0,0203	1280,657	<0,0001
	a	3,27E-03	4,77E-04	6,8433	<0,0001				Residual	15	0,0002	0		
	b	1,92E-04	2,13E-05	9,0048	<0,0001				Total	17	0,0408	0,0024		
A	y0	3,75E-03	7,05E-04	5,3193	<0,0001	0,9984	0,9967	0,9963	Regression	2	0,0197	0,0099	2430,483	<0,0001
	a	2,55E-03	1,97E-04	12,9685	<0,0001				Residual	16	0,0001	0		
	b	6,11E-05	7,51E-06	8,142	<0,0001				Total	18	0,0198	0,0011		
F	y0	1,35E-02	1,05E-03	12,9181	<0,0001	0,9927	0,9855	0,9837	Regression	2	0,0145	0,0073	886,9491	<0,0001
	a	1,95E-03	2,95E-04	6,6031	<0,0001				Residual	13	0,0001	0		
	b	6,65E-05	1,03E-05	6,4443	<0,0001				Total	15	0,0147	0,001		

C-31 s propelery R, A a F - empirické modely



Obr. 27 Empirické modely pro propelery R, A a F, upevnění na tyči

Ze zpracování bylo vypuštěno několik bodů pro nejvyšší rychlosti, pro něž nebyl k dispozici dostatek kalibrací a tyto body se výrazně odchylovaly od celkového trendu.

Z obr. 27 i z tabulky 9 je zřejmé, že modely vystihují data poměrně přijatelně a jak modely celkově, tak i jednotlivé empirické konstanty modelů jsou statisticky významné.

4.5 Zhodnocení

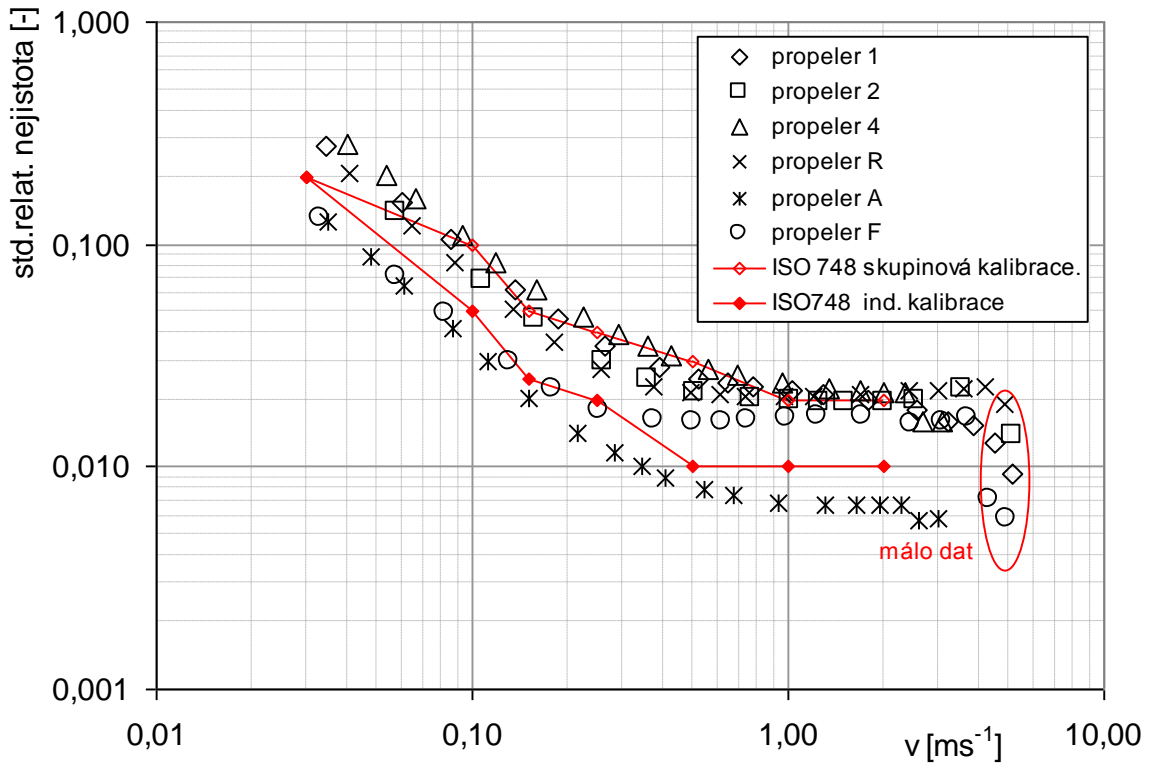
V předchozích kapitolách uvádíme výsledky zpracování dat pro jednotlivé typy propelerů. Kromě toho považujeme za žádoucí porovnat též jednotlivé typy propelerů při různém upevnění mezi sebou.

Na obr. 28 jsou vyneseny závislosti standardní relativní nejistoty pro všechny propelery s upevněním vrtulí na tyči. Je vidět, že hodnoty nejistoty jsou pro většinu propelerů značně blízké, výjimku tvoří propelery F a A. Propeler F má, podobně jako propeler A, výrazně nižší nejistoty než ostatní propelery pro malé rychlosti (do ca 0,15 ms⁻¹), pro vyšší rychlosti se více blíží k ostatním propelerům a od rychlosti ca 1,0 ms⁻¹ se již nejistoty víceméně shodují. Oproti tomu propeler A má oproti ostatním propelerům (s výjimkou propeleru F pro malé rychlosti) výrazně nižší nejistoty (nepatrně menší než poloviční) v celém rozsahu rychlostí.

Na obr. 29 jsou vyneseny závislosti standardní relativní nejistoty pro všechny propelery se závažím hmotnosti 5 a 10 kg. Tato závaží se běžně používají (a tedy byla k dispozici data) jen s propelery typu 1 a 4. Navíc se závaží hmotnosti 5 a 10 kg typově výrazně odlišuje od závaží větších hmotností (tj, 25, 50 a 100 kg), takže je uvádíme samostatně.

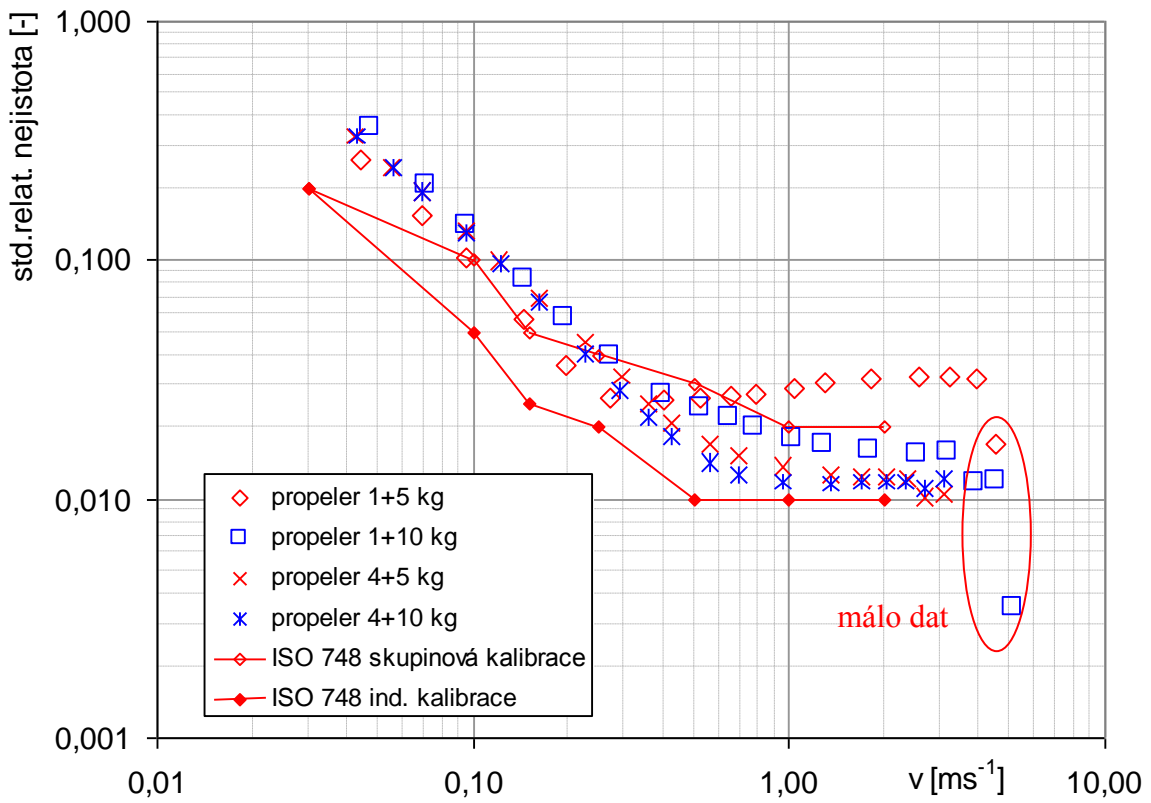
Z grafu na obr. 29 je zřejmé, že pro menší rychlosti (do ca 0,4 ms⁻¹) má vrtule s propelerem 1 a závažím 5 kg mírně lepší hodnoty nejistot než ostatní. Od této rychlosti je však nejistota

C-31 - upevnění na tyči



Obr 28 C-31 – všechny propelery s upevněním na tyči

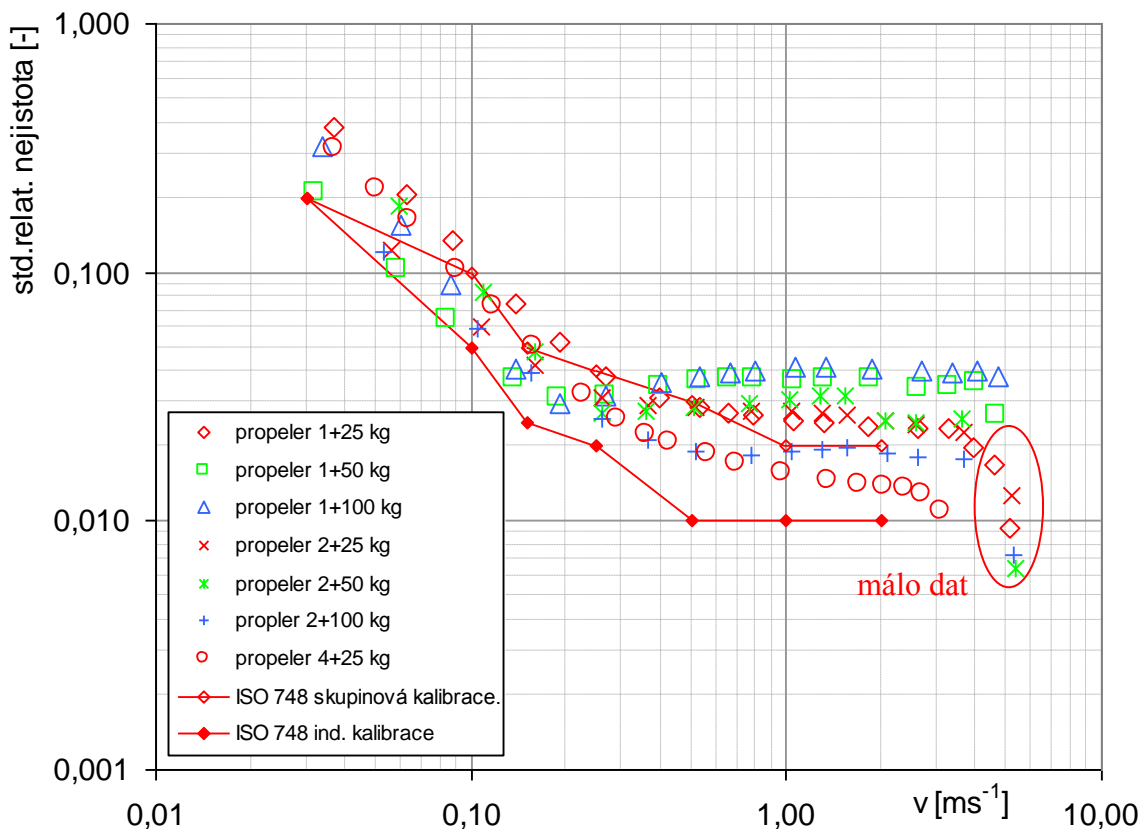
C-31 - závaží 5 a 10 kg



Obr 29 C-31 – všechny propelery se závažím 5 a 10 kg

prakticky konstantní (ca 3%), zatímco pro ostatní uvedené kombinace hodnoty nejistoty dále klesají, pro propeler typu 4 více než pro propeler 1, a pro rychlosti větší než ca $0,7 \text{ ms}^{-1}$ jsou pro propeler 4 se závažím 5 nebo 10 kg již menší než 1,5 %.

C-31 - závaží 25, 50 a 100 kg



Obr 30 C-31 – všechny propelery se závažím 25, 50 a 100 kg

Pro těžší závaží proudnicového tvaru s vrtulí upevněnou na jeho špicí je situace poněkud složitější než pro lehká závaží hmotnosti 5 a 10 kg – viz obr. 30. Zdá se, že prakticky nelze vysledovat jakékoliv trendy závislosti na hmotnosti závaží, ba ani na typu propeleru. Zajímavé a dosti překvapivé je, že pro řadu typů vrtulí s těžším závažím má standardní relativní nejistota minimum v oblasti rychlostí ca $0,2 - 0,4 \text{ ms}^{-1}$ (viz obr. 30). Je sice pravdou, že minimum není příliš výrazné, leč přesto rozdíl mezi minimem a běžnými hodnotami pro rychlosti rovné nebo větší než 1 ms^{-1} představuje např. pro vrtuli s propelerem 1 na závaží hmotnosti 100 kg ca 1 % nejistoty (minimum ca 2%, běžné hodnoty ca 3 %).

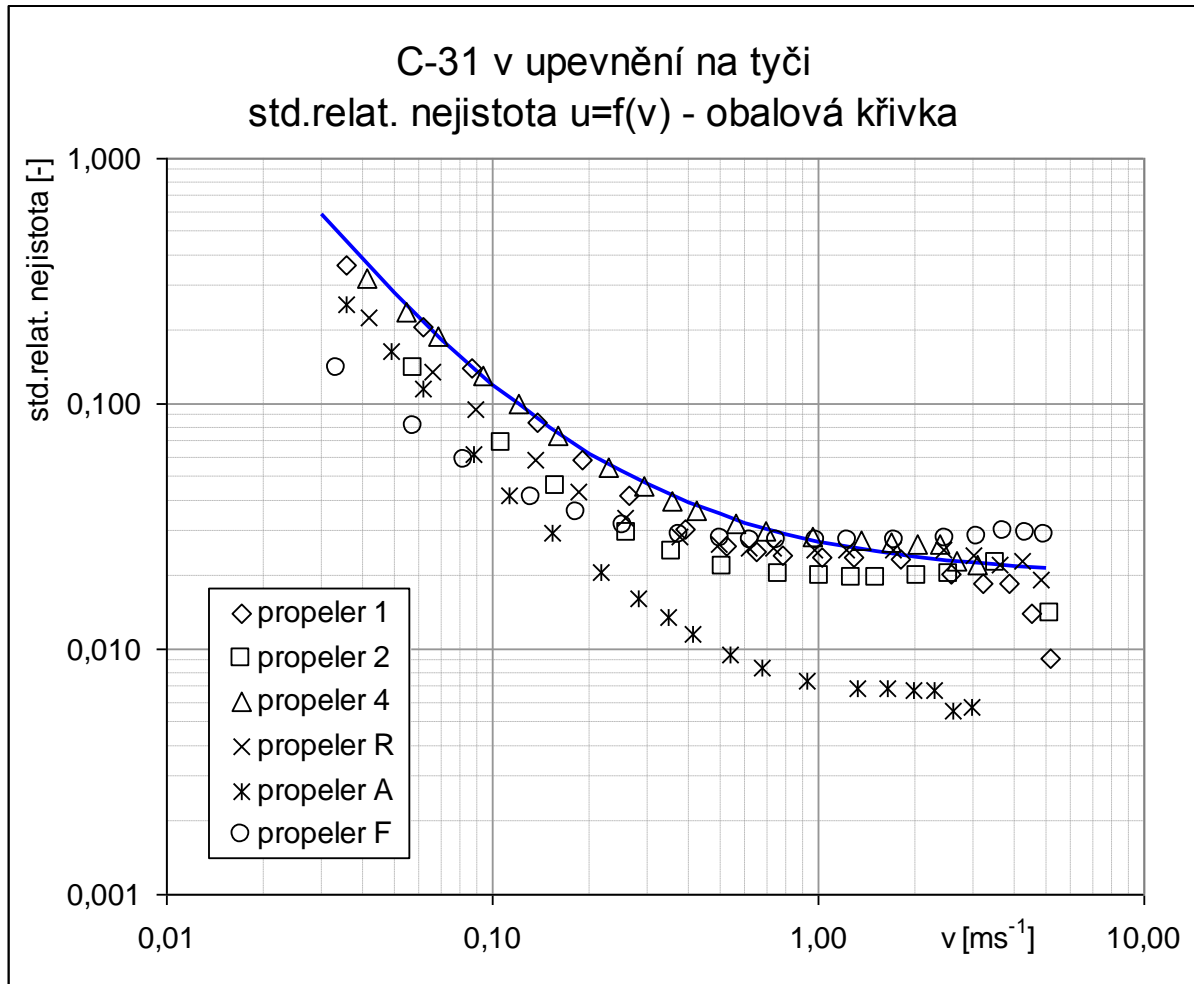
Z hlediska praktického stanovení odhadu standardních relativních nejistot náhodné složky kalibrace se nám zdá být pro vrtule v upevnění na tyči nejvhodnější horní obalová křivka dat, která v podstatě udává maximální hodnoty nejistoty. Tato doporučená křivka se týká propelerů typu 1, 2, 4 a R, které jsou nejběžnější. Pro propeler typu A, který vykazuje nejistotu výrazně nižší, lze použít příslušný graf; totéž pro propeler F, který je z hlediska nejistot přechodem mezi propelerem A a propelery ostatními.

Pro vrtule se závažím jsou mezi jednotlivými typy vrtulí (tedy jednotlivými kombinacemi tělo Ott C-31 + propeler + upevnění) rozdíly natolik velké, že jednotnou křivku popisující doporučenou hodnotu nejistoty nelze stanovit a je nutné ji z příslušných grafů odhadovat individuálně.

Na první pohled je z obr. 28 a 31 patrné, že obalová křivka se bude blížit křivkám pro propeler 4, který má pro danou rychlost prakticky nejvyšší (byť jen o málo) hodnoty nejistoty. Metodou pokusů a omylů byla vyhovující křivka s dostatečně jednoduchými koeficienty nalezena, lze ji popsat rovnicí

$$u = 2 \cdot E^{-2} + \frac{7 \cdot E^{-3}}{v} + \frac{3 \cdot E^{-4}}{v^2}$$

a je vykreslena spolu s daty na obr. 31.



Obr 31 Doporučená standardní relativní nejistota $u=f(v)$

Zde je vhodné poznamenat, že jen málo vrtulí reaguje na proudění při rychlostech menších než ca 0,05 – 0,07 ms⁻¹, takže vcelku tragicky vypadající počátek křivky s nejistotami 20 a více procent lze do značné míry zanedbat; pro zpravidla již dobře měřitelnou rychlost 0,10 ms⁻¹ je relativní standardní nejistota náhodné složky kalibrace ca 10 % a jak je z obrázku patrné, dosti rychle klesá a při rychlosti 0,20 ms⁻¹ již dosahuje jen 5 – 6 %, pro rychlost 1,0 ms⁻¹ pak jen ca 2,5 %.

5. Diskuse

V předložené práci uvádíme výsledky zpracování kalibračních dat pro různé typy vrtulí (těla Ott C-2 s propelery 1, 2, 3, 5 a 6 v upevnění na tyči, těla Ott C-31 s propelery 1, 2, 4, R, A a F v upevnění na tyči a s různými závažími) z hlediska jejich nejistot.

Ve smyslu ČSN EN ISO 748 je nejistota kalibrace dána dvěma složkami, a to složkou náhodnou, danou charakteristikami vrtule, její údržby a řadou dalších vlivů, kterou jsme se pokusili stanovit v této práci, a složkou systematickou, danou nejistotami měřicího zařízení kalibrační laboratoře, uvedenou v kalibračním listu.

Určité hodnoty náhodné složky nejistoty kalibrace jsou uvedeny pouze v jediném prameni, který se nám podařilo zjistit. Tím je všeobecně uznávaná norma ČSN EN ISO 748, která v tabulce E5 v příloze uvádí orientační hodnoty nejistoty kalibrace. Hodnoty jsou dány pro několik málo rychlostí jednak pro vrtule kalibrované individuálně (což je případ všech vrtulí, jejichž kalibrační data jsme použili), jednak pro vrtule se skupinovou kalibrací. Obě tyto série hodnot jsme vynášeli do všech našich grafů zobrazujících standardní relativní nejistoty. Jak je z grafů (obr. 5, 17, 20, 23, 26, 28, 29 a 30) zřejmé, námi získané hodnoty se pohybují v blízkém sousedství hodnot udávaných normou, velmi často mezi oběma hodnotami udávanými ISO. **Je zde však jeden háček – naše hodnoty jsou standardní nejistoty, odpovídající směrodatné odchylce, zatímco norma tvrdí, že se jedná o nejistoty rozšířené, s pokrytím 95 %, které odpovídají dvojnásobku směrodatné odchylky. Po příslušném přepočtu na pokrytí 95 % by naše hodnoty tedy byly dvojnásobné.**

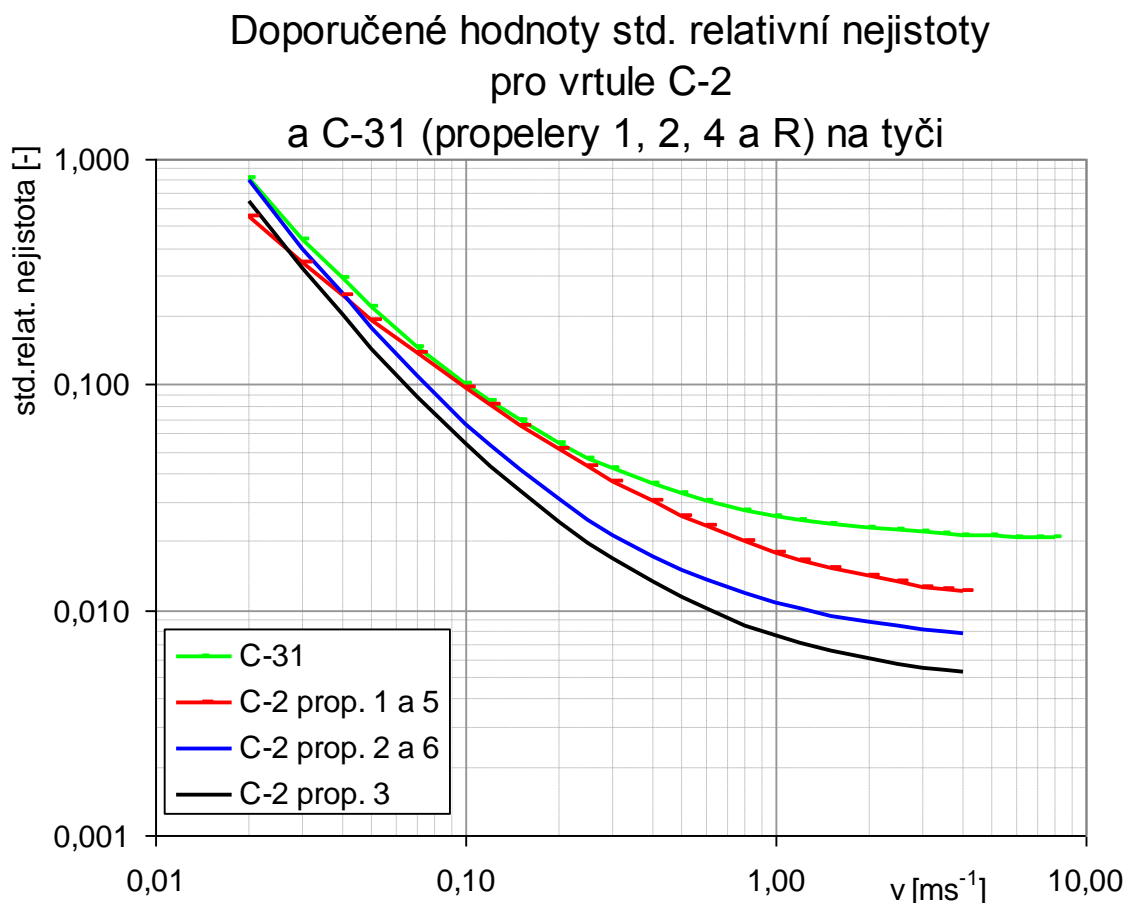
V kap. E.1 přílohy norma praví, že hodnoty dále uváděné jsou výsledky výzkumů prováděných do prvního vydání této normy v r. 1968 a jedná se hodnoty orientační, které by si měl uživatel upřesnit. Zřejmě již nebude možné dohledat původní práce, z nichž tabulka E5 vychází a které nejsou citovány; není jasné o jaké typy vrtulí (včetně propelerů a způsobu uchycení) se jednalo, za jakých podmínek byly vrtule kalibrovány atd. Kromě toho mohlo během přenosu dat z použité literatury i během přenosu dat mezi jednotlivými verzemi norem dojít k chybám.

Do značné míry vzbuzuje podezření, že k chybám došlo nejen porovnání námi získaných hodnot s hodnotami udávanými normou – těžko předpokládat, že se během let kvalita vrtulí a jejich údržby natolik zhoršila, že se nejistota více než zdvojnásobila – ale i tvar čar spojujících hodnoty udávané ISO, kde namísto očekávatelné víceméně plynulé čáry hodnoty vykazují ne zcela smyslné skoky. Teoreticky by však ony skoky též mohly být způsobeny hrubým zaokrouhlením hodnot na zhruba 0,5 %.

V rámci vyhodnocení dat jsme se pokusili stanovit doporučené horní mezní hodnoty standardní relativní nejistoty. Vzhledem k tomu, že vrtule se závažími se chovají dosti odlišně podle typu propeleru a hmotnosti závaží, takže nejistotu je nutné stanovovat individuálně, pro vrtule v upevnění na tyči lze (z výjimkou několika propelerů) takové hodnoty odvodit. Jako doporučené hodnoty jsme uvažovali horní obalové křivky závislosti $u = f(v)$ – viz obr. 15 a 31. Přitom je zajímavé, že pro vrtuli Ott C-31 jsou hodnoty pro téměř všechny (přesněji s dvěma výjimkami) propelery značně blízké a je tudíž možno použít jedinou křivku, pro vrtuli Ott C-2 se hodnoty rozdělují podle stoupání propeleru a výsledné analytické křivky jsou tedy tři. Výsledné závislosti jsou skresleny dohromady na obr. 32.

Pro praktické použití nalezených závislostí nejistot na rychlosti proudění je třeba mít na paměti, že spolehlivost odhadů nejistoty je vzhledem k různému množství dat pro různé vrtule různá. U vrtulí Ott C-2 lze celkově očekávat dobrou spolehlivost, protože pro všechny propelery byl počet případů ca 110, tedy více než dostatečný. Značně složitější je situace u vrtulí Ott C-31, zejména pak v některých kombinacích. Různé subjekty vlastní různé sestavy,

kteře jsou využívány s různou intenzitou. Celkové počty případů pro jednotlivé kombinace jsou zachyceny v tab. 2. Některé kombinace nebyly ani zpracovány vzhledem k příliš malému počtu zachycených případů (propeler 1 a závaží 5 kg, propeler 2 a závaží 10 kg, propeler 4 a závaží 50 kg, propeler R a závaží). Celkově lze počítat s tím, že pro kombinace, pro něž bylo k dispozici nejméně 30 případů, budou odhady nejistoty relativně přijatelné, pro menší počty



Obr 32 Doporučená standardní relativní nejistota $u=f(v)$

případů (což jsou speciálně vrtule s propelerem 1 a zejména 2 na závaží hmotnosti 100 kg) je nutné počítat s větší chybou odhadu nejistoty.

6. Závěry a doporučení

V předložené práci jsme se pokusili stanovit náhodnou složku nejistoty kalibrace hydrometrických vrtulí ve smyslu ČSN EN ISO 748.

Nejistotu, resp. závislost odhadu standardní relativní nejistoty u [-] na rychlosti proudění v [ms^{-1}] jsme stanovili pro následující typy vrtulí:

- vrtule Ott C-2 s propelery 1, 2, 3, 5 a 6 na tyči;
- vrtule Ott C-31 s propelerem 1 na tyči a se závažím hmotnosti 10, 25, 50 a 100 kg;
- vrtule Ott C-31 s propelerem 2 na tyči a se závažím hmotnosti 25, 50 a 100 kg;
- vrtule Ott C-31 s propelerem 4 na tyči a se závažím hmotnosti 5, 10 a 25 kg;
- vrtule Ott C-31 s propelery R, A a F na tyči.

Hodnoty odhadu standardní relativní nejistoty pro danou rychlost proudění lze nalézt, resp. odečíst v příslušných grafech (viz obr.5, 17, 20, 23, 26, 28, 29 a 30); pro vrtule Ott C-2 a vrtule Ott C-31 na tyči (s výjimkou propelerů A a F) byly odvozeny rovnice, dovolující výpočet nejistoty pro danou rychlost proudění.

Výsledky naší práce vzbuzují pochybnost o správnosti hodnot v tabulce E5 přílohy ČSN EN ISO 748, která uvádí orientační hodnoty rozšířené nejistoty (s pokrytím 2x směrodatná odchylka čili 95%) pro několik rychlostí proudění a vrtule kalibrované jednak individuálně (což je náš případ), jednak skupinově. Naše data, představující standardní nejistotu (s pokrytím 1x směrodatná odchylka čili ca 68%) se zpravidla pohybují v těsné blízkosti, velmi často i mezi oběma hodnotami uváděnými ISO. ISO bohužel neuvádí původní pramen, takže jimi uváděné hodnoty nelze ověřit, považujeme však za nepravděpodobné, že by se kvalita vrtulí či jejich údržby v průběhu let změnila natolik, aby nejistota vzrostla dvojnásobně.

Jak ukázaly výsledky naší práce, bohužel nelze jednoznačně vymezit oblasti vhodného rozsahu použití jednotlivých typů propelerů. Lze však na základě našich zjištění doporučit následující obecná opatření pro minimalizaci náhodné složky nejistoty:

- Vždy se snažit, pokud je to možné, měřit v profilech o menší průtočné ploše, tedy s většími rychlostmi, protože bez ohledu na typ vrtule a jejího upevnění pro malé rychlosti je standardní relativní nejistota velká (ca 10 % pro $v=0,1 \text{ ms}^{-1}$), ale rychle klesá a pro $v=0,5 \text{ ms}^{-1}$ se již pohybuje v rozmezí jen ca 0,8 až téměř 4 % podle typu vrtule, propeleru a upevnění.
- Při použití vrtule Ott C-2 používat propelery s větším stoupáním spíše než se stoupáním menším (optimálně propeler 3, při velmi malých hloubkách propeler 6 – viz obr. 5).
- Při použití vrtule Ott C-31 na tyči je optimální použití propeleru A (viz obr. 28), který má nejistotu podstatně nižší než všechny ostatní, dále v pořadí propeler F, R, 2, 1 a 4. Rozdíly mezi propelery 1, 2, 4 a R jsou, jak je patrné z obr. 28, však již poměrně malé.
- Přitom je však nutné zohlednit místní podmínky – v případě šikmého nátoku na vrtuli teoreticky může být výraznější vliv nejistoty dané překročením úhlu komponentnosti propeleru. Tento vliv, resp. jeho velikost, však není znám. Výsledky měření, prováděných v 60. letech minulého století ve VÚV Ing. Sotorníkem se díky povodni 2002 nezachovaly, údaje uváděné Jovanovičem [4] jsou pro zastaralé typy vrtulí a provedená literární rešerše nepřinesla žádný výsledek. Úhly komponentnosti jsou přitom podle firemních materiálů fy Ott:

pro Ott C-2, propeler 1 – 30°, 2 – 20°, 3 – 10°, 5 – 20°, 6 – 10°

pro Ott C-31, propeler 1, 2 a 4 – 5°, R – 15°, A – 45°.

Kalibrační interval doporučuje ČSN ISO 2537. V čl. 7.6 uvádí požadavek na četnost kalibrace vrtulí slovy „V praxi se u vrtulí kalibrovaných individuálně provádí překalibrování v pravidelných intervalech nebo po 300 hodinách provozu podle toho, které z obou období je kratší“. Z toho jasně vyplývá, že podle doporučení ISO si interval kalibrace má volit vlastník či uživatel měřidla. Většina subjektů, používajících v ČR hydrometrické vrtule, má zvolen dvouletý cyklus rekalibrace. Jak ukazuje naše zkušenost z kalibrační laboratoře, podstatně důležitější (z hlediska konsistence výsledků kalibrace) než interval kalibrace je vliv údržby vrtule, a to včetně způsobu jejího uložení pokud není užívána. V kalibrační laboratoři nemáme možnost zjistit jak dlouho (kolik hodin) byla vrtule provozována, avšak i u subjektů, kde lze předpokládat značné využití vrtulí (např. jednotlivé pobočky ČHMÚ) máme zkušenost, že při dobré údržbě je dvouletý interval kalibrace zcela dostatečný. Přitom při

zvláště důležitých měření úředního charakteru (např. garančních měření vodních strojů a pod.) bývalo zvykem (a investor může ve smlouvě vyžadovat) všechny použité vrtule recalibrovat po ukončení měření, aby bylo zajištěno, že během měření se nestalo nic, co by činnost vrtulí mohlo ovlivnit.

Do budoucna považujeme za žádoucí doporučit pokračování prací zejména v následujících dvou směrech, a to:

- upřesnění hodnot nejistot pro vrtule Ott C-31 s těmi propelery a tak upevněné, pro které je dosud dat relativně málo (viz tab. 2);
- určení nejistot daných směrovými vlastnostmi jednotlivých propelerů, resp. nejistot stanovení rychlosti při proudění šikmém vůči ose propeleru.

Navržené upřesnění hodnot je podle našeho názoru zejména vzhledem k nákladům na kalibraci záležitostí spíše výhledovou, která by opět měla vycházet převážně z archivních dat po jejich rozšíření a doplnění dalšími kalibracemi zákaznických vrtulí.

Oproti tomu určení nejistot daných směrovými vlastnostmi propelerů představuje standardní výzkumnou úlohu, pro kterou bude třeba mj. navrhnout a vyrobit přídatné zařízení na kalibrační vozík, které dovolí otočit vrtuli o přesný úhel, a veškerá měření bude vzhledem k jejich speciálnímu charakteru možné provádět pouze v rámci tohoto úkolu.

7. Literatura

- [1] ČSN EN ISO 748 Hydrometrie. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků. 2008
- [2] Ramešová, L. a Mattas, D.: Nejistota kalibrace hydrometrických vrtulí. In: Otázky vodohospodářského výzkumu a praxe. ČVUT v Praze, Fakulta stavební 2009. str. 98-102
- [3] Mattas, D., Ramešová, L.: Influence of water temperature on results of current meter calibration and measurement. Journ. of Hydrology and Hydromechanics 61, 2013/3 p. 208 – 213
- [4] Jovanovič, S.: Chidrometrisko krilo, teorija, tariranje i tačnost pri merenj. Chidrotehnički institut Jaroslav Černi, Beograd 1957
- [5] ČSN ISO 2537 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech - Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem

