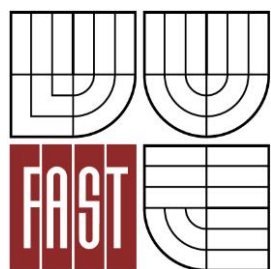




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATERSTRUCTURES

VLIV ČETNOSTI VÝMĚNY OLEJOVÉ NÁPLNĚ VODOMĚRNÉ VRTULE NA NAMĚŘENOU RYCHLOST

THE INFLUENCE OF THE FREQUENCY OF CHANGESOIL ON THE MEASURED SPEED BY
HYDROMETRIC PROPELLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

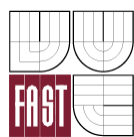
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. MICHAELA JURČOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T027 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Michaela Jurčová
Název	Vliv četnosti výměny olejové náplně vodoměrné vrtule na naměřenou rychlost
Vedoucí diplomové práce	Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C.: *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

ČSN EN ISO 748. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech, Metody rychlostního pole*, 2001

Slota, R.: *HYDRO 11, User's Manual, Integrated System for Hydrometric Data Processing and Discharge Evaluation in Open Channels and Closed Conduits*. Bratislava, 2000

Žoužela, M.: *Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou*, disertační práce, VUT v Brně 2005

Zásady pro vypracování

Úkolem studenta je provést experimentální zjištění vlivu doby provozu vodoměrné vrtule mezi výměnami její olejové náplně na naměřenou rychlost proudění. V laboratoři ÚVS-LVV na speciálním malém testovacím okruhu bude mnohokrát opakovat měření rychlostní charakteristiky několika propelerů a vyhodnotí tendenci změny této charakteristiky v závislosti na čase. Výstupem bude doporučení pro uživatele hydrometrovací metody, jak často je potřeba měnit olejovou náplň vodoměrné vrtule pro dosažení potřebné přesnosti měření bodových rychlostí a následné stanovení průtoku v profilu.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá vlivem doby provozu vodoměrné vrtule mezi výměnami její olejové náplně na naměřenou rychlost proudění. Z dat jež byly naměřeny v laboratoři ÚVS-LVV na speciálním malém testovacím okruhu, je možno určit velikost chyby hydrometrování při nevyměňování olejové náplně. Jedním z výstupů je graf závislosti doby měření na procentuální chybě měření. Kdy na základě zpracování výsledků je možné určit jaký vliv má na výsledky hydrometrování stará olejová náplň.

Klíčová slova

Vodoměrná vrtule, hydrometrovací proces, zkušební trať, olejová náplň

Abstract

This diploma thesis is focused at effect of time working hydrometric propeller between changes oil on measured velocity. From data what we have measured in laboratories of Department of water structures on the special small test track, we able to define size of measure bug, when we don't change oil. One of outputs is graph of measure bug to measure time. Results of measure will be effect of oil.

Keywords

Hydrometrical propellers, hydromeasuring process, test track, oil

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Michaela Jurčová *Vliv četnosti výměny olejové náplně vodoměrné vrtule na naměřenou rychlost*. Brno, 2015. 65 s., 25 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 16.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Michaela Jurčová

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 16.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Michaela Jurčová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala především vedoucímu práce Ing. Pavlovi Zubíkovi, Ph.D za veškerou pomoc při měření a za všechny podmětne připomínky při zpracovávání mé práce. Také bych chtěla poděkovat pracovníkům LVV, kteří mi pomohli vytvořit ideální podmínky k měření. A v neposlední řadě také panu Ing. Robertovi Bernému za poskytnutí materiálů k hydrometrovacím vrtulím.

OBSAH

1.	Úvod	11
2.	Historie hydrometrovacích metod	12
2.1.	Způsoby měření rychlosti proudu a průtoku	12
2.1.1.	Do nádoby	13
2.1.2.	Pomocí indikátorových metod	13
2.1.3.	Vodoměrné vrtule	14
2.1.3.1.	Historie hydrometrovacích vrtulí	14
2.1.3.2.	Konstrukce vrtule typu OTT-C2	17
2.1.4.	Některé bezkontaktní metody pro měření průtoků	18
3.	Výpočty v hydrometrování a terminologie	19
3.1.	Normy	19
3.2.	Bodové rychlosti	19
3.2.1.	Metoda rychlostního pole	19
3.3.	Průtočný průřez, průtok, průřezová rychlost	21
3.4.	Stanovení rychlosti	23
3.5.	Stanovení průtočného množství	25
4.	Nejistota měřené veličiny	26
4.1.	Všeobecně k hydrometrování	26
4.2.	Standardní nejistota typu A	27
4.3.	Standardní nejistota typu B	28
4.4.	Přídavné nejistoty	29

5.	Experimentální část práce	31
5.1.	Průběh práce	31
5.1.1.	Použité vybavení	32
5.1.2.	Parametry měrného okruhu	34
5.1.3.	Testovaná měrná zařízení	38
5.1.4.	Ovládání měřicího procesu	38
5.1.5.	Parametry měření	40
5.2.	Zpracování naměřených dat	40
5.2.1.	Stanovení odchylky měření	41
5.1.	Vyhodnocení výsledků měření	44
5.2.	Provozní náklady za olej	56
6.	Závěr	57
7.	Seznam použitých zdrojů	58
8.	Seznam použitých zkratk a symbolů	60
9.	Seznam obrázků	63

Přílohy

Záložka není definována.

Chyba!

1. ÚVOD

Cílem diplomové práce je provést experimentální zjištění vlivu doby provozu vodoměrné vrtule mezi výměnami její olejové náplně na naměřenou rychlost proudění. V laboratoři ÚVS-LVV na speciálním malém testovacím okruhu byla mnohokrát opakována měření rychlostní charakteristiky dvou těl hydrometrovací vrtule při dvou různých teplotách a vyhodnocována tendence změny této charakteristiky v závislosti na čase. Zjištěné závěry mohou poskytnout uživatelům hydrometrovací metody doporučení pro četnost výměny olejové náplně vodoměrné vrtule a tím zpřesnit stanovování bodových rychlostí a průtoků v profilu.

Ze získaných dat je možno usoudit, jakou chybu lze očekávat, pokud se nebude měnit olejová náplň jak je obvyklé, tedy vždy před začátkem nového měření.

Základní motivací pro celý výzkum byla neznalost vlivu staré olejové náplně na přesnost měření v závislosti na délce měření.

Pro postihnutí různých vlivů jsme zvolili použití dvou různých těl (staré a nové) a dvou poměrně výrazně se lišících provozních teplot.

Díky těmto výsledkům by pracovníci věnující se hydrometrování, mohli získat cenné údaje, které by mohly vést i ke snížení spotřeby oleje do hydrometrovacích vrtulí, nebo naopak k větší pečlivosti při jeho výměně, aby nedocházelo, k ničení těl hydrometrovacích vrtulí.

Tato práce může přispět k vyšší přesnosti celého hydrometrovacího procesu a může zamezit zbytečným chybám vzniklým technickou nezpůsobilostí hydrometrovacích vrtulí, jejichž technický stav přímo ovlivňuje výsledky hydrometrovacích procesů.

Výstupem z diplomové práce je soubor grafů, které vyjadřují zjištěné velikosti chyb za daných parametrů.

2. HISTORIE HYDROMETROVACÍCH METOD

Měřením rychlosti proudění vody, případně průtoku, se lidstvo zabývá již několik století. Důkazy o vodním hospodářství jsou známy minimálně již od 4. tisíciletí před naším letopočtem, kdy lidé budovali závlahové a odvodňovací kanály v Mezopotámii mezi řekami Eufrat a Tigris. Další informace máme z Číny, Řecka atd.

Nejznámějším jménem historie v oblasti hydrodynamiky je Leonardo da Vinci (1452 – 1519), slavný malíř, sochař, lékař, ale i architekt, mechanik, fyzik a inženýr. Stavěl průplavy, navrhl vodní turbínu, zabýval se infiltrací srážek, vznikem pramenů, pohybem a měřením vody v korytě, výtokem vody z nádoby, vznikem a tvarem víru apod. [13].

Další, ale zdaleka ne jedinou osobou, ve vodním hospodářství byl Daniel Bernoulli (1700 – 1782), který sestavil základní rovnici pro pohyb kapaliny účinkem síly tíže na základě dynamických zákonů [13].

Jak je vidět v celé historii, lidstvo provázela touha o ovládnutí vody a pochopení jejich vlastností.

Základem veškeré teoretické činnosti je experimentální měření průtoků, rychlosti apod. Z toho důvodu se již celá tisíciletí rozvíjí způsob, jak tyto veličiny měřit, a jak zajistit minimalizování chyb při měření.

2.1. Způsoby měření rychlosti proudu a průtoku

Pro měření se dá využít několikero způsobů, které se od sebe vzájemně liší náročností, přesností a délkou. V dnešní době se setkáváme s využitím moderních metod, jako je ultrazvuk nebo elektromagnetická indukce. Tyto postupy jsou však omezeny na podmínky se známými parametry, jako je tvar koryta a z toho vycházející výška hladiny, průtočné množství. Ostatní metody se zdají být více mechanické, avšak lidský faktor, který se zde významně projevuje, z nich může vytvořit velmi přesné metody, ovšem musíme počítat i s opačnou variantou. Mechanické metody jsou využívány

především na malých tocích, ale i velkých tocích. Jako nejpřesnější z mechanických metod se zdá metoda za použití hydrometrovacích vrtulí, která je také používána ke kalibraci výše zmíněných elektronických přístrojů.

Metody měření průtoků:

- měrné přelivy,
- objemová a hmotnostní metoda (kap. 2.1.1.),
- indikátorové metody (kap. 2.1.2.),
- hydrometrování – měření rychlosti proudění ve zvolené síti bodů a následná integrace přes plochu využívající:
 - a) kontaktní metody
 - tlaková sonda,
 - žhavená sonda,
 - vodoměrné vrtule (kap. 2.1.3.),
 - b) bezkontaktní metody (2.1.4.)
 - LDA (laserová dopplerovská anemometrie),
 - PIV (rovinná laserová anemometrie),
 - UVP (ultrazvukové profilování).

2.1.1. Do nádoby

Je to jedna z nejstarších metod měření průtoků. Princip je založený na zachytávání tekutiny do nádob (PVC, plech) menších rozměrů, většinou objem do 20 l, maximálně 100 l při ruční manipulaci, případně mnohonásobně větší objemy při strojové manipulaci. Následně se výpočtem v závislosti na čase určí průtok a rychlost.

2.1.2. Pomocí indikátorových metod

Tento druh měření se využívá v nepříznivých hydraulických podmínkách, kde nelze využít hydrometrické vrtulí, případně při speciálně zaměřených měření. Při této metodě se značí část průtoku stabilními chemikáliemi nebo radionuklidy, které jsou pak

sledovány v kontrolních profilech. Tento způsob je však naprosto nevhodný, pro naše využití.

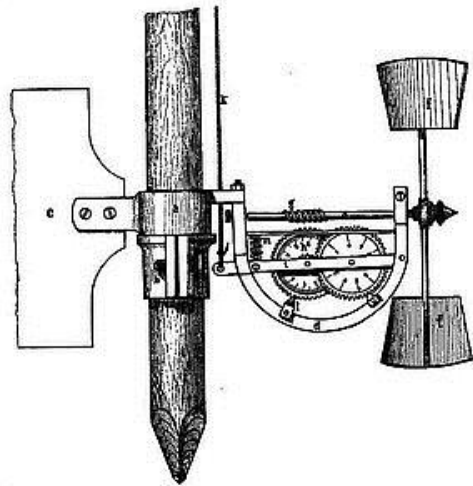
2.1.3. Vodoměrné vrtule

Toto měření spočívá v měření rychlosti proudění vody a následném zjišťování parametrů (hloubka, vzdálenost mezi svislicemi) pro výpočet plochy průtočného profilu. Pro provedení měření je důležité zvolit vhodný měrný profil, který by se měl umisťovat v úseku s volnou hladinou, v souměrném, nejlépe rovném úseku koryta, v úseku s dostatečnou hloubkou a bez bočních kontrakcí a vzduť hladiny. Takový úsek je, na přírodním korytě, většinou velmi problematické najít a proto se provádí dodatečné úpravy jako je odstranění velkých kamenů, vegetace apod., také by se mělo dbát na vhodné umístění svislic tak, aby výsledek co nejvíce odpovídal skutečnosti.

Pro výpočet rychlostí a průtoků v profilu, který je měřený hydrometrovacími vrtulemi, je postup uveden v kap. 3., nebo také v [9].

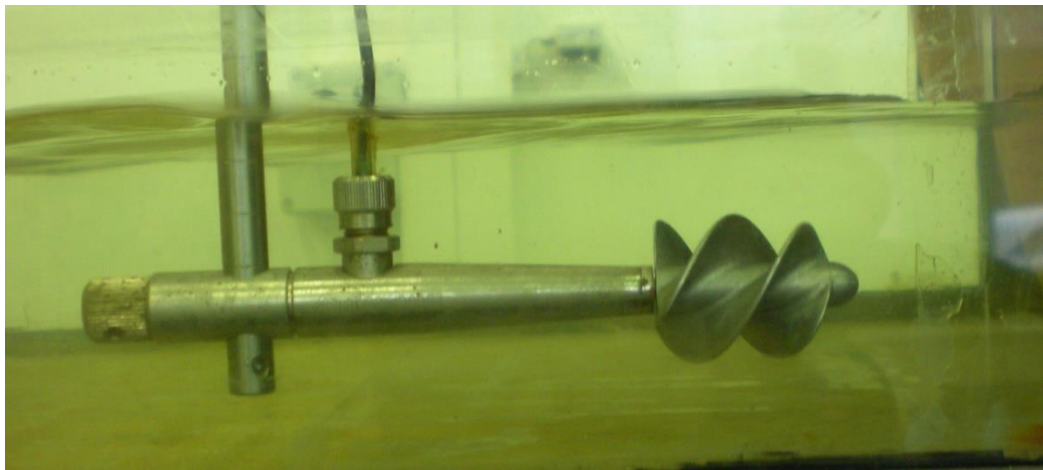
2.1.3.1. Historie hydrometrovacích vrtulí

Hydrometrovací vrtule byla poprvé navržena v roce 1787 R. Woltmannem. Měla horizontální osu s propelerem tvaru lopatkového kola se dvěma šikmými lopatkami a mechanickým počítadlem otáček. Tento přístroj začal být velmi záhy hojně využíván. V průběhu let se změnil tvar propelerů, kdy došlo k transformaci lopatkových kol na propelery šroubovicové (Trevianos 1820), tento druh vrtule je používán dodnes



Obr. 2.1: Původní Woltmannova vrtule [14]

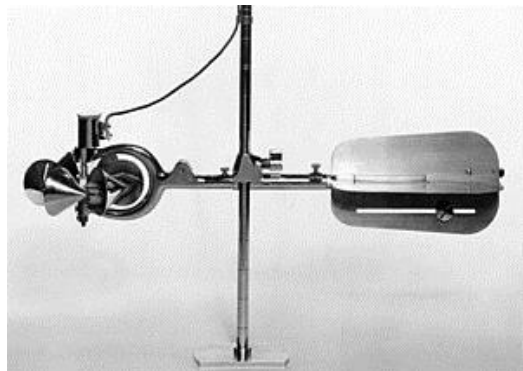
Dalším velkým objevem v oblasti hydrometrických vrtulí byl vynález profesora pražské techniky Švýcara Harlachera, který nahradil mechanické počítadlo elektrickým zařízením na signalizaci otáček. V roce 1875 přišel velký zlom v produkci vrtulí, protože roku 1873 založil v Bavorsku Albert Ott „Mathematisch-Mechanisches Institut A. OTT“, kde se až do dnešní doby vyrábí hydrometrovací vrtule.



Obr. 2.2: Vrtule typu OTT-C2 [foto: M. JURČOVÁ]

Během let se na trhu s hydrometrovacími vrtulemi vystříдалo několik výrobců, měli jsme i tuzemskou výrobu s názvem Metro, avšak do dnešních dob mimo OTT Messtechnik přečkala pouze SEBA.

Stejně jak postupoval vývoj v Evropě, tak probíhal podobně i v Americe. Zde se prosadil v roce 1885 inženýr W. G. Price, který si patentoval typ vrtule, jež byl podobný přístroji pro měření rychlosti větru, podstata byla ve svislé ose se šesti kornouty po obvodu.



Obr. 2.3: Priceova vrtule[14]

Obě dvě vrtule mají, jak jsem již popsala dosti zásadní rozdíly. Je zde také důležité zmínit jejich výhody, ale také nevýhody. Woltmannův typ má problém zaznamenat jiné proudění nežli to, které je rovnoběžné s osou vrtule, naopak Priceova vrtule zaznamená všechny směry vektoru rychlosti v horizontální rovině. Také se udává, že vrtule s horizontální osou, musí být správně ustavena ve směru proudění, mají při malých rychlostech větší nejistotu měření. Ale i přes tyto, dalo by se říct, důležité faktory má Woltmannův typ řadu výhod a získává si stále větší oblibu i v oblastech, kde dříve převažovaly Priceovy vrtule. Je to i díky tomu, že výrobci dodávají vrtule s těly různých velikostí a stoupání šroubovice, čímž se přístroje stávají velmi flexibilními a použitelnými v širokém spektru podmínek. A jak se měnily tvary a vyvíjela elektronika, docházelo i ke změnám způsobu zaznamenávání impulzů až do dnešní podoby, kdy jsou akustická zařízení nahrazena čítači impulzů elektronicky. Další informace o historii hydrometrovacích vrtulí v [6].

2.1.4. Některé bezkontaktní metody pro měření průtoků

Jedná se především o nové metody, které se začali vyvíjet v závislosti na technickém pokroku celé společnosti, protože měření pomocí předchozích metod bylo dosti časově náročné. Pro měření se tedy začalo využívat ultrazvuku, elektromagnetické indukce a laserových anemometrií (LDA a PIV).

Metoda ultrazvuková využívá elasticity a hustoty média, na kterém závisí rychlost zvukové vlny. Měří se tedy změna rychlosti a fázového posunu zvukového signálu v různých směrech proudění vody. Měření je ovlivněno teplotou a tlakem vody a koncentrací rozpuštěných látek ve vodě. Toto zařízení je v dnešní době instalováno na velkém množství míst, jako jsou objekty na čistírnách a úpravnách vod, na odtocích vod z průmyslových podniků apod. Pro měření je důležité znát parametry koryta. Ke kalibraci a kontrole správnosti měření je využíváno hydrometrovacích vrtulí.

Metoda elektromagnetické indukce je založena na indukci elektrického napětí ve vodiči (proud vody) při jeho pohybu v magnetickém poli (vytvářeno uměle kolmo na proudění vody). Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná proudění vody [1].

3. VÝPOČTY V HYDROMETROVÁNÍ A TERMINOLOGIE

V této kapitole jsou uvedeny pojmy ze základů mechaniky tekutin, jež se uplatňují v další části práce.

3.1. Normy

Pro měření průtoku kapalin a proces hydrometrování existuje několik evropských potažmo i českých norem jako hlavní je ČSN ISO 2537 Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem [2]. Dále pak novější mezinárodní norma ČSN EN ISO 748 Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků [3].

Uvedené normy se odkazují na ISO 772 Hydrometrická měření – Terminologie.

3.2. Bodové rychlosti

Bodové rychlosti jsou skutečné rychlosti v daném bodě a čase měření. Změření bodových rychlostí vychází stanovení průřezové rychlosti (viz Metoda rychlostního pole 3.2.1.). Bodová rychlost je stanovována pomocí kalibrační rovnice (viz 3-3), která je uvedena v kalibračním listu dané vrtule (příloha AA).

3.2.1. Metoda rychlostního pole

Metoda rychlostního pole je využívána jak v systémech tlakových, tak i v systémech s volnou hladinou. V následujících odstavcích je popsána pouze metoda pro systémy s volnou hladinou dle [9], kde je i podrobně popsána.

Pomocí metody rychlostního pole je stanoven průtok, přičemž celá metoda je založena na integraci funkce rychlostního pole přes plochu průtočného průřezu S dle vztahu

$$Q = \int_S f(u_i) \cdot dS = \iint_S f(u_i) \cdot dx \cdot dy, \quad (3-1)$$

kde

$f(u_i)$ je funkce rychlostního pole.

Obvykle funkci rychlostního pole stanovíme tak, že ve vhodně zvolených měrných bodech průtočného profilu jsou změřeny bodové rychlosti u_i , které jsou pak následně aproximovány vhodnou matematickou funkcí [8].

Dle [3] je funkce stanovena a následně integrována po výšce měrného profilu, kde jsou stanoveny svislicové pásy, čímž dostáváme průměrnou svislicovou rychlost \bar{v} . Dále jsou pro získání průtočného množství hodnoty interpolovány. Postup je zapsán vztahem

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot \bar{v}_i, \quad (3-2)$$

kde

Q stanovený průtok,

b_i šířka svislicového pásu,

h_i hloubka svislicového pásu,

\bar{v}_i průměrná rychlost na svislici,

m počet svislicových pásů.

Metoda, kterou jsem popsala výše, se užívá nejčastěji pro kalibraci a kontrolu dat. Je zde taky značný rozptyl přesnosti, který je přímo závislý na kvalitě vstupních dat a na jejich množství. To znamená, že pokud se nám povede zajistit velké množství přesných dat, je chyba snížena na minimum, naopak při nedostatečné síti měrných bodů a kvalitě provedení, velmi rychle narůstá velikost chyby.

Tato práce je zaměřena na měření bodových rychlostí vodoměrnými vrtulemi, je to kontaktní metoda, která je používána již od roku 1500, kdy první měření uskutečnil, dle dostupných pramenů, Leonardo da Vinci až do dnešní doby. V současné době je

hydrometrování nejvyužívanější metodou pro stanovení průtoku ve vodním hospodářství. Je to také z toho důvodu, že je to v podstatě jediné měřicí zařízení, které je schopno měřit rychlost proudu v podmínkách prizmatických i přírodních koryt s volnou hladinou, kde protéká relativně znečištěná voda.

Každá vodoměrná vrtule má svůj vlastní vztah, který udává přepočítání mezi počtem otáček a rychlostí proudění. Tento vztah se nazývá kalibrační rovnice a udává se ve tvaru:

$$u = \alpha + \beta \cdot n_f, \quad (3-3)$$

kde

u je rychlost proudu,

n_f je frekvence otáček,

α, β jsou konstanty uvedené v kalibračním listu vodoměrné vrtule (příloha AA).

Přesnost měření vodoměrnou vrtulí závisí na různých faktorech, jako jsou typ vrtule, měřená rychlost, turbulence proudu, doba měření, pozice vrtule a dalších.

3.3. Průtočný průřez, průtok, průřezová rychlost

Problematika se také váže k průřezu proudového vlákna dS a průtoku dQ proudovým vláknem. Kde dS je elementární ploška, která vznikne, pokud provedeme řez kolmý k proudnici a průtok dQ je objem kapaliny, který tímto průřezem projde za časovou jednotku, obvykle sekundu.

Vyjádření (uvedeno dle [5]): Rychlost v průřezu 1-1 proudového vlákna je pro všechny částice u , takže za dobu dt urazí dráhu $dl = u \cdot dt$. Projde tedy tímto průřezem o ploše dS objem kapaliny $dS \cdot dl$. Přejdeme-li k jednotce doby, bude dráha $dl = u \cdot 1 = u$ a průtok

$$dQ = dS \cdot dl_1 = dS \cdot u \quad [m^3 / s] \quad (3-4)$$

Tímto je však vyjádřen pouze průtok objemový, jsou zde však možnosti vyjádřit i průtok hmotnostní nebo tíhový, k jejich vyjádření vynásobíme $dS \cdot u$ hustotou a gravitačním zrychlením. Pro určení celého průtoku použijeme tento vztah:

$$Q = \int_S dQ = \int_S u \cdot dS \quad [m^3 / s] \quad (3-5)$$

Zde je Q objem kapaliny, jež projde průtočným průřezem za jednotku doby (obvykle sekundu) a S je plocha průtočného průřezu.

Průtočný průřez však nemusí být vždy jen rovinná plocha, protože pokud nejsou křivočará proudová vlákna souběžná, je nutno vzít za průtočný průřez řez proudů zakřivenou plochou k proudnicím. Také obvykle neznáme rozdělení rychlostí v průtočném průřezu, jejich vyčíslení je obtížné až nemožné. Proto jsme nuceni zavést do výpočtů střední průřezovou rychlost v [m/s], která je definovaná vztahem

$$Q = \int_S u \cdot dS = v \cdot \int_S dS = v \cdot S \quad (3-6)$$

Z toho vztahu nám vychází rovnice pro střední průřezovou rychlost:

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{\int_S u \cdot dS}{S} \quad [m / s] \quad (3-7)$$

3.4. Stanovení rychlosti

Pro výpočet ustáleného proudění vody v otevřeném korytu, které má pravidelný tvar. Pro tento případ použijeme na výpočet průřezové rychlosti v Chézyho rovnici, která je nejjednodušším způsobem stanovení rychlosti v těchto podmínkách. Vycházíme ze vztahů

$$v = C \cdot \sqrt{R \cdot i} \quad (3-8)$$

$$R = \frac{S}{O} \quad (3-9)$$

kde

C je rychlostní součinitel,

R je hydraulický poloměr,

i je sklon čáry energie,

S je průtočná plocha,

O je omočený obvod.

Při výpočtu Chézyho rovnicí se do omočeného obvodu nezapočítává hladina, protože styk vody se vzduchem má výrazně nižší tření než je tření vody o stěny koryta. Také rychlostní součinitel C není konstantní, je přímo závislý na tvaru průtočného průřezu, drsnosti stěn případně i na sklonu. Nejčastější výpočet C je dle Pavlovského

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^y, \quad (3-10)$$

kde
$$y = 2.5 \cdot \sqrt{n} - 0.13 - 0.75 \cdot \sqrt{R}(\sqrt{n} - 0.1) \quad (3-11)$$

n je drsnostní součinitel,

R je hydraulický poloměr

a dle Manninga

$$C = \frac{1}{n} \cdot R^{1/6} \quad (3-12)$$

n je drsnostní součinitel,

R je hydraulický poloměr.

Pokud je omočený obvod složen z různých drsností probíhá výpočet průměrné drsnosti dle vztahu

$$n = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot O_i}{O}, \quad (3-13)$$

kde

n_i je dílčí drsnostní součinitele,

O_i je dílčí omočené obvody,

n je drsnostní součinitel,

O je celkový omočený obvod.

3.5. Stanovení průtočného množství

Pro stanovení průtočného množství v korytech s ustáleným prouděním je využívána rovnice spojitosti (kontinuity), která v podstatě vyjadřuje zákon zachování hmotnosti. Z předchozích vztahů jsem získala rychlost kapaliny a z dřívějších údajů je mi již známá plocha průřezu. Průtočné množství tedy získám dle vztahu

$$Q = v \cdot S, \quad (3-4)$$

kde

v je rychlost kapaliny,

S je plocha průřezu,

Q je průtočné množství.

4. NEJISTOTA MĚŘENÉ VELIČINY

Všechna měření fyzikální veličiny jsou předmětem nejistot. Tyto jsou způsobeny systematickými chybami (vlivy) na použitém zařízení pro kalibraci a měření, nebo náhodnými rozptyly, například nedostatečnou citlivostí použitého zařízení pro měření. Výsledek měření je tak pouze odhadem správné hodnoty měřené veličiny, a tudíž je úplný jen, když je doprovázen údajem jeho nejistoty [3].

Rozdíl mezi správnou a měřenou hodnotou je chyba měření. Chyba měření, která nemůže být známá, způsobí nejistotu v přesnosti výsledku měření [3].

Chyba měření není způsobena jedním vlivem, ale je to kombinace složek chyb, které nastávají při daném procesu. Z toho důvodu je velikost chyby přímo závislá na složitosti měření, jeho dílčích složkách apod., protože celková chyba je kombinací jednotlivých chyb.

Nejistoty jsou kombinovány využitím statistických pravidel na kombinování směrodatných odchylek, udávající správné úvahy o korelacích mezi všemi chybami měření z různých zdrojů, aby se vypočítaly jak systematické, tak náhodné chyby. Výsledné hodnoty nejistoty jsou odsouhlasené standardní nejistoty; odpovídají jedné směrodatné odchylce rozdělení pravděpodobnosti chyb měření [3].

Podrobným popisem chyb i s návodem na jejich stanovení se zabývá [3], kde je také uvedeno několik typů chyb.

4.1. Všeobecně k hydrometrování

Metoda měření průtoku spočívá v rozdělení příčného průřezu koryta, které se bere v úvahu, na pásy svislicemi a v měření šířky, hloubky a průměrné rychlosti spojených s každou svislicí.

Průměrná rychlost \bar{v}_i na každé svislici je vypočtena z jednoho nebo několika měření bodové rychlosti provedených v každé z různých hloubek na svislici. Průtok se počítá dle vztahu (3-4).

4.2. Standardní nejistota typu A

Metoda vyhodnocení standardních nejistot vstupní veličiny spočívá ve statistické analýze opakování sérií měření. Vycházíme-li z toho, že jen nezávislých stejně přesných pozorování $n > 1$, tak pak bude odhad výsledné hodnoty y reprezentován hodnotou aritmetického průměru, vypočítaného zcela stejně jako u případu chyb, dle tohoto vztahu

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4-1)$$

Nejistota příslušející k danému odhadu y se vypočítá jako směrodatná odchylka výběrového průměru, tedy

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{xi}^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4-2)$$

Nejistota se v tomto typu obvykle značí u_{Ay} , tudíž při použití vztahu

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} \quad (4-3)$$

můžeme konstatovat, že tato nejistota je zapříčiněna nestálostí zjištěných hodnot. Je-li provedeno málo měření cca < 10 , je určení výsledné hodnoty málo spolehlivé a raději se přikláníme k odhadnutí metodou B (kap. 4.3.), která je založena na jiném základě, než jsou výpočty z naměřených hodnot.

4.3. Standardní nejistota typu B

Zjištění a následně vyhodnocení standardních nejistot vstupních veličin metodou typu B je, jak již bylo výše zmíněno, založeno na jiných než statistických přístupech k vyhodnocení sérií měření. Metoda B, jak by se mohlo tedy zdát, se nevyznačuje jednoznačnou souvislostí, ale je zde možno i odhadnout vliv náhodných chyb, např. při kalibraci s využitím minulých měření, mezi něž nejčastěji patří:

- údaje výrobce měřicí techniky,
- zkušenosti z předchozích sérií měření,
- zkušenosti s vlastnostmi chování materiálů a techniky a poznatky o nich,
- údaje získané při kalibraci a z certifikátů,
- nejistoty referenčních údajů v příručkách. [10]

Dílčí nejistoty jednotlivých zdrojů u_{Bzj} vedou k určování nejistoty metodou typu B. Známe-li maximální odchylku j -tého zdroje nejistoty z_{jmax} , určí se nejistota u_{Bzj} dle vztahu

$$u_{Bzj} = \frac{z_{jmax}}{k}, \quad (4-4),$$

kde

k je součinitel ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí.

V některých případech je hodnota standardní nejistoty známa např. z kalibračního certifikátu měřidla.

Výpočet výsledné nejistoty provedeme dle vztahu

$$u_{By} = \sqrt{\sum_{j=1}^p A_j^2 \cdot u_{Bzj}^2}, \quad (4-5)$$

kde

u_{Bzj} jsou nejistoty jednotlivých zdrojů,

A_j je jich součinitel citlivosti.

Tímto vztahem nejistota vyjádřená metodou B získá charakter směrodatné odchylky.

4.4. Přídavné nejistoty

Relativní kombinovaná standardní nejistota v měření [%] je dána vztahem:

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i)^2 (u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{\bar{v},i}^2)}{(\sum_{i=1}^m (b_i \cdot d_i \cdot \bar{v}_i))^2}, \quad (4-6),$$

kde

$u(Q)$ je relativní kombinovaná standardní nejistota průtoku,

$u_{b,i}$, $u_{d,i}$, $u_{\bar{v},i}$ jsou relativní standardní nejistoty [%] šířky, hloubky a průměrné rychlosti měřených na svislici i ,

u_s nejistota způsobená nestálou odezvou vodoměrné vrtule (u_{cm}), měřiče šířky (u_{bm}) a hloubky sondou (u_{ds}).

$$u_s = \sqrt{u_{cm}^2 + u_{bm}^2 + u_{ds}^2} \quad (4-7)$$

Pro tento výraz může být brána odhadnutá praktická hodnota 1%.

u_m nejistota způsobená omezeným počtem svislic a

m počet svislic.

Průměrná rychlost \bar{v}_i na svislici i je odhad průměru měření bodové rychlosti provedených v jedné nebo více hloubkách na svislici. Nejistota v \bar{v}_i se vypočítá následovně:

$$u(\bar{v}_i)^2 = u_{p,i}^2 + \left(\frac{1}{n_i}\right)(u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2), \quad (4-8)$$

kde

$u_{p,i}^2$ nejistota průměrné rychlosti \bar{v}_i způsobená omezeným počtem hloubek, v nichž jsou provedena měření na svislici i ;

n_i počet hloubek na svislici i , v nichž jsou provedena měření rychlosti;

$u_{c,i}$ nejistota rychlosti při zvláštním bodu měření na svislici i způsobená nedostatkem reprodukce vodoměrné vrtule;

$u_{e,i}$ nejistota bodové rychlosti ve zvláštní hloubce na svislici i způsobená fluktuacemi rychlosti (pulzacemi) v proudu během doby expozice vodoměrné vrtule.

Kombinace vztahů (4-6) a (4-8) poskytuje:

$$u(Q)^2 = u_m^2 + u_s^2 + \frac{\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i)^2 \left(u_{b,i}^2 + u_{d,i}^2 + u_{p,i}^2 \left(\frac{1}{n_i} \right) (u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \right)}{\left(\sum_{i=1}^m (b_i d_i \bar{v}_i) \right)^2} \quad (4-9)$$

Jestliže měření svislicemi jsou umístěna tak, že jsou si pásy průtoků (b_i, d_i, v_i) přibližně rovny a složky nejistot jsou rovnocenné od svislice ke svislici, potom je vztah (4-9) zjednodušen na [3]:

$$u(Q)^2 = \left[u_m^2 + u_s^2 + \left(\frac{1}{m} \right) \left(u_b^2 + u_d^2 + u_p^2 + \left(\frac{1}{n} \right) (u_{c,i}^2 + u_{e,i}^2) \right) \right]^{1/2} \quad (4-10)$$

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST PRÁCE

Před započítím práce bylo třeba učinit několik důležitých voleb. Pro získání dostatečného množství údajů bylo nutné vytvořit příslušné množství měření, které by vytvořilo základ pro výpočet a následné vyvození výsledků. Mnohokrát opakující se kalibrační cyklus zajistil jednak dostatečně dlouhý provozní pobyt vrtule ve vodě a současně umožnil průběžné sledování hledané změny rychlostní charakteristiky vrtule. Pro práci byl použit speciální malý testovací okruh ÚVS- LVV fakulty stavební a další hardwarové a softwarové vybavení k této práci náležející.

5.1. Průběh práce

Nejprve byl zvolen vhodný kalibrační cyklus, který by se mohl použít opakovaně a zabral co nejméně času a zároveň, aby nebyl tak krátký, že by nebyl schopen ukázat sledované změny v charakteristice vrtule. Nastavování sady kalibračních rychlostí bylo prováděno prostřednictvím nastavování frekvencí čerpadla instalovaného na testovacím okruhu. Dále bylo nutno zvolit teploty, při kterých se bude provádět testování. Byly vybrány teploty dvě, které byly voleny tak, aby co nejvěrněji kopírovaly měření v praktických podmínkách, tedy 5°C (při měření v přírodních korytech v chladnějších obdobích roku) a 20°C (pro měření v odpadních korytech průmyslových podniků, ČOV a přírodních korytech v letních měsících). Při nastavení těchto parametrů bylo ještě třeba určit vhodné doby měření a způsob navazování měření s pauzami, aby celková doba testování nepřekročila přijatelnou dobu v jednotlivých dnech. Tyto parametry jsme zvolili na základě zkušebního měření. Dále jsme se rozhodli použít pro měření dvě těla. Jedno zcela nové a jedno používané již delší dobu, která se měnila vždy po pěti proběhlých kalibračních cyklech. Testované tělo tedy přibližně 80 minut bylo provozováno ve vodě a po odstranění zbytkové kapky vody kolem výstupu hřídelky z těla bylo toto ponecháno volně na vzduchu 80 minut až několik dní. Tento postup měl simulovat měřičskou praxi při přemísťování se mezi měrnými profily. K výměně oleje došlo pouze na začátku celé skupiny měření, které mělo v případě první skupiny měření v jeden den tři pětice cyklů měření a v den druhý dvě pětice cyklů na novém i starém

těle. Při měření druhé skupiny bylo na základě výsledků z 1. skupiny měření rozhodnuto prodloužit dobu provozu vrtule ve vodě, tedy navýšit množství naměřených kalibračních cyklů. V první den byly naměřeny tři pětice cyklů, a další tři dny byly měřeny vždy dvě pětice cyklů. Celkem tedy bylo provedeno na jednu olejovou náplň s každým tělem při první skupině 25 cyklů a při skupině druhé 45 kalibračních cyklů.

Po zvolení všech výše uvedených parametrů začalo testování. Jednotlivé výsledky měření byly průběžně zpracovány, aby se odhalily případné chyby, které by mohly nastat při měření.

Veškeré údaje o dnech, časech měření a teplotě byly zaznamenávány do nachystaného formuláře a tím byla usnadněna práce při vyhodnocování a ukládání dat.

5.1.1. Použité vybavení

Pro měření byl využit speciální malý testovací okruh ÚVS-LVV (Obr. 5.1) v budově B Fakulty stavební, Vysokého učení technického, kde bylo nainstalované měřicí zařízení i s napojením na softwarovou podporu.

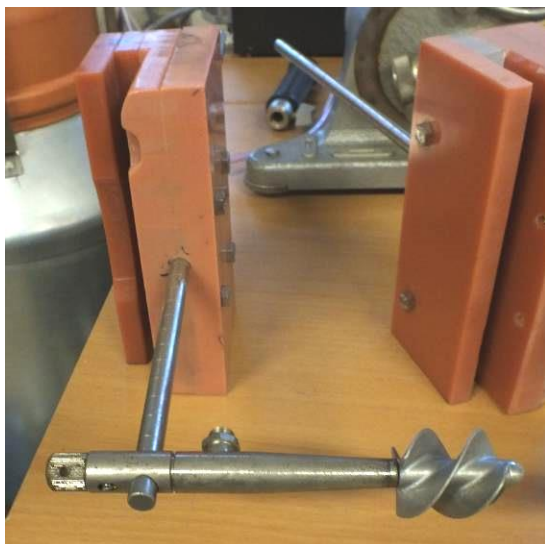


Obr. 5.1: Testovací okruh [foto: M. JURČOVÁ]

Součástí měřicího zařízení je také držák, těla vrtule OTT-C2 (Obr. 5.2 a 5.3) jež jsou upevněny pomocí speciálního přípravku do správné pozice v měrném okruhu.



Obr. 5.2: Nové tělo při ustavování do správné pozice pomocí speciálního přípravku [foto: M. JURČOVÁ]



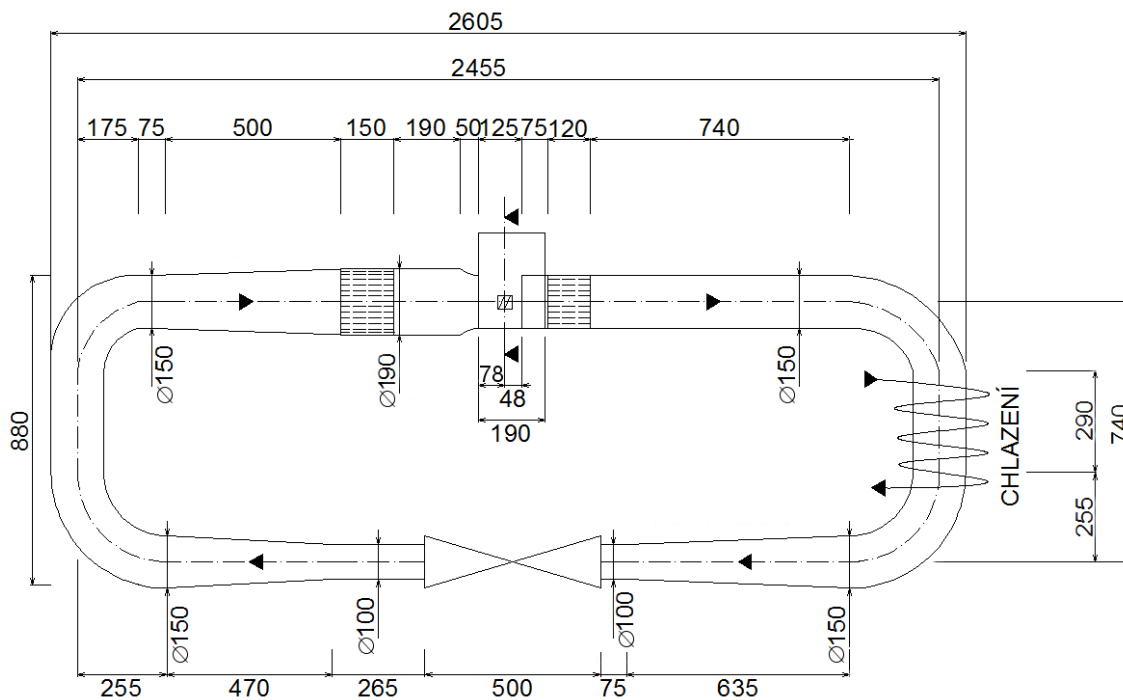
Obr. 5.3: Staré tělo připravené k testování [foto: M. JURČOVÁ]

Tímto zařízením byla zajištěna vysoká přesnost a opakovatelnost umístění testované vrtule v měrném prostoru při všech měřeních.

Měřicí proces byl řízen, pro daný účel vyvinutým, softwarem PropMeasure, jenž ovládal všechna zařízení v měrné trati a čítal impulzy z měrné vrtule. Pouze zapínání chlazení probíhalo ručně v závislosti na aktuální potřebě.

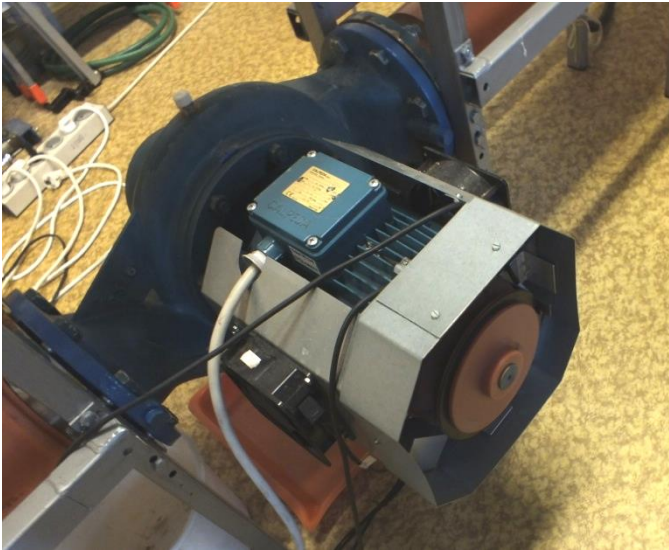
5.1.2. Parametry měrného okruhu

Měření probíhalo, jak již bylo uvedeno výše, na speciálním malém testovacím okruhu ÚVS- LVV. Okruh je vyroben z PVC potrubí. Je upevněn na nosné konstrukci vyrobené z ocelových profilů. Schéma okruhu je uvedeno na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Schéma měrného okruhu

Pro zajištění pohybu vody je použito odstředivé oběžné čerpadlo o příkonu 1,5 kW s litinovým kolem a řízením měničem frekvence (Obr. 5.5).

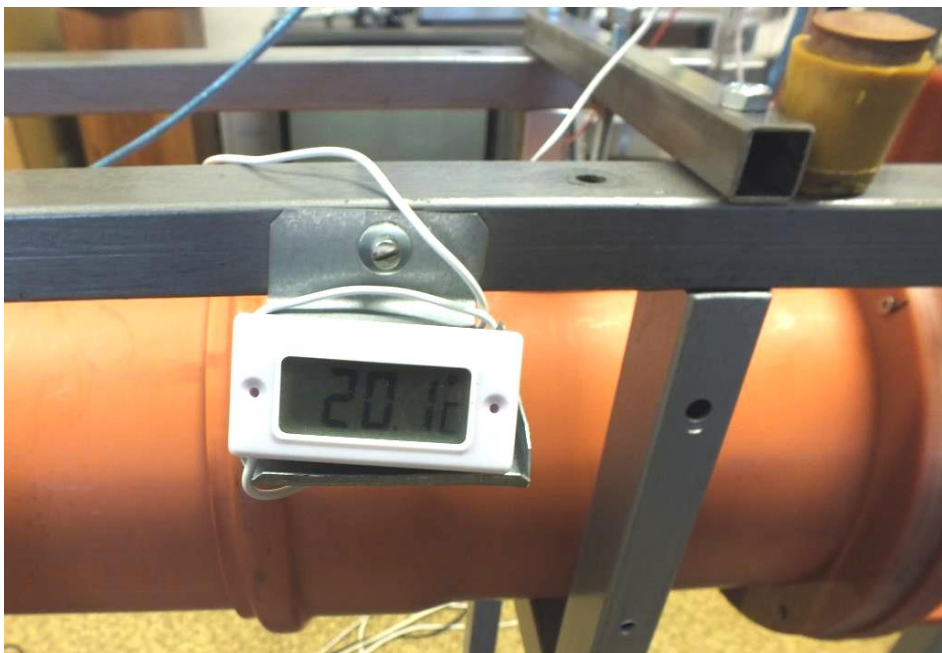


Obr. 5.5: Odstředivé čerpadlo s nezávislým chlazením [foto: M. JURČOVÁ]

Čerpadlo je umístěno ve spodní části trati [12]. Elektromotor ovládající čerpadlo je pro větší efektivitu chlazen třemi nezávislými ventilátory, které se zapínají automaticky v závislosti na teplotě elektromotoru.

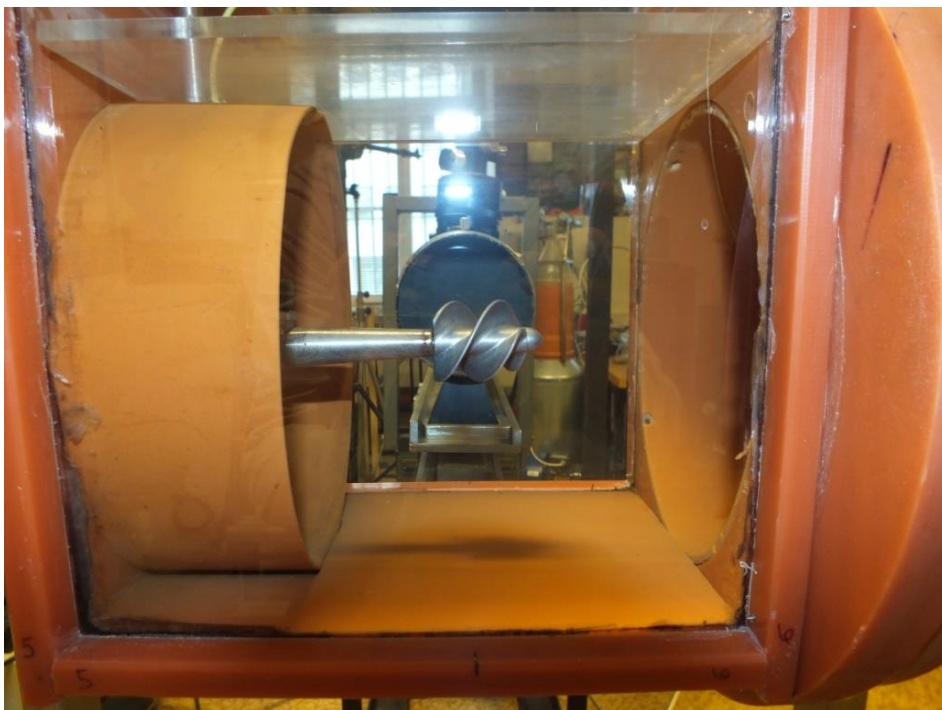
Na trati je dále nainstalované optické měření otáček motoru oběhového čerpadla, tyto data jsou přenášena do měřicího počítače, tímto je zajištěno přesnější definování kalibrační rychlosti. Aby bylo rychlostní pole dostatečně homogenní je protiproudící kanál vybaven voštinou a konfuzorem těsně před měrným prostorem.

Celý okruh je napojen na výkonný chladicí systém, který zajišťuje potřebnou teplotu vody v měrném okruhu. Což bylo velmi důležité pro udržení výše uvedené požadované teploty. Teplota je zjišťována dvěma ponornými termistorovými teploměry. Jeden slouží k přímému sledování teploty v trati (Obr. 5.6) a druhý je připojen k počítači, kde jsou hodnoty zaznamenávány a ukládány.



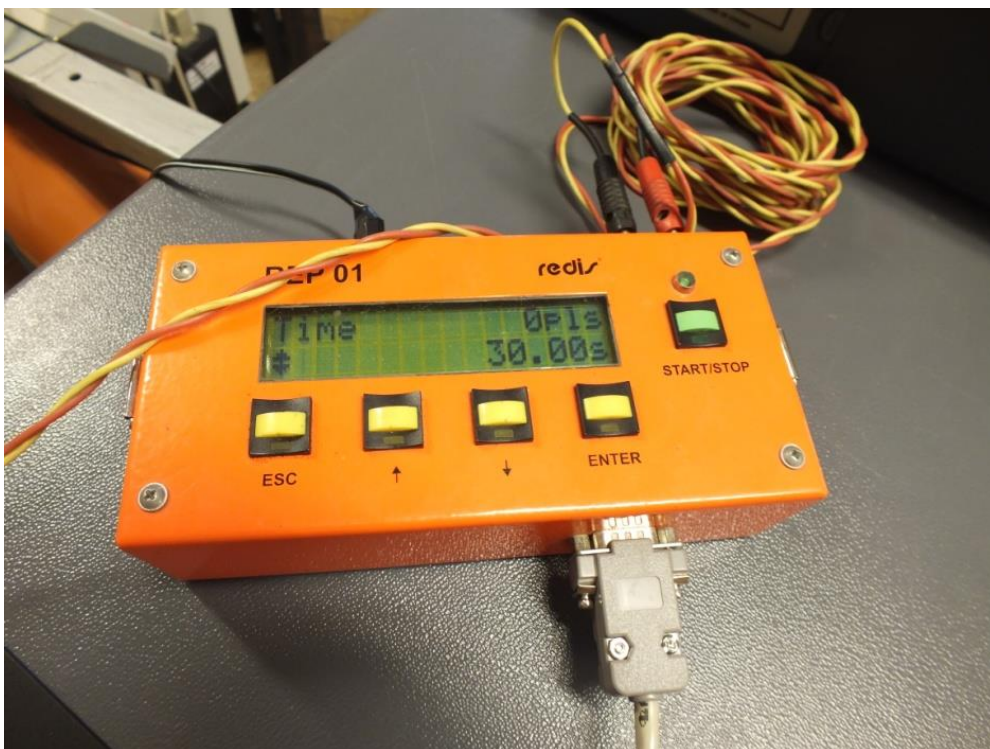
Obr. 5.6: Teploměr k přímému sledování teploty [foto: M. JURČOVÁ]

Měření probíhá v měrném prostoru, který se nachází v horní části měrného okruhu. Jeho rozměry jsou uvedeny ve schématu na Obr. 5.4.



Obr. 5.7: Měrný prostor [foto: M. JURČOVÁ]

Prostor má boční stěny ze skla (Obr. 5.7), které umožňují vizuální kontrolu při měření hydrometrovací vrtulí a hlavně jsou využívány k referenčnímu měření rychlosti metodou LDA [12]. Pomocí jednotky REP 01 (Obr. 5.8) jsou v počítači zaznamenávány impulzy z hydrometrovací vrtule.



Obr. 5.8: Čítač impulzů REP 01 s možností připojení k počítači [foto: M. JURČOVÁ]

Další důležitou součástí měřicího zařízení byl externí chladič (Obr. 5.9), který zajišťoval udržení požadované teploty při měření. Chladič byl umístěn ve vedlejší místnosti, z důvodů vyšší efektivity chlazení a pro udržení zvukového komfortu v místnosti při měření. Chladič má regulační jednotku, kde bylo možné nastavit teplotu, na kterou má být voda v okruhu chlazená. Chladič byl střídavě zapínán a vypínán ručně v závislosti na aktuální potřebě chlazení – k vývinu tepla dochází ve zkušební trati pouze při vyšších rychlostech proudění.



Obr. 5.9: Externí chladicí zařízení s ovládací jednotkou [foto: M. JURČOVÁ]

5.1.3. Testovaná měrná zařízení

Pro měření byly použity dvě těla hydrometrovacích vrtulí firmy OTT C2 (těla s výrobními čísly 198 054 a 320 611), na kterých byl nasazen propeler č. 5. První použité tělo je v provozu již několik let. Druhé tělo bylo úplně nové. Pro upevnění do měrného prostoru byl použit speciální držák, do kterého byla vrtule ustavována pomocí speciálního přípravku (Obr. 5.2), aby nedocházelo ke změnám v umístění těl vrtule a tím se minimalizovala z toho plynoucí chyba.

5.1.4. Ovládání měřicího procesu

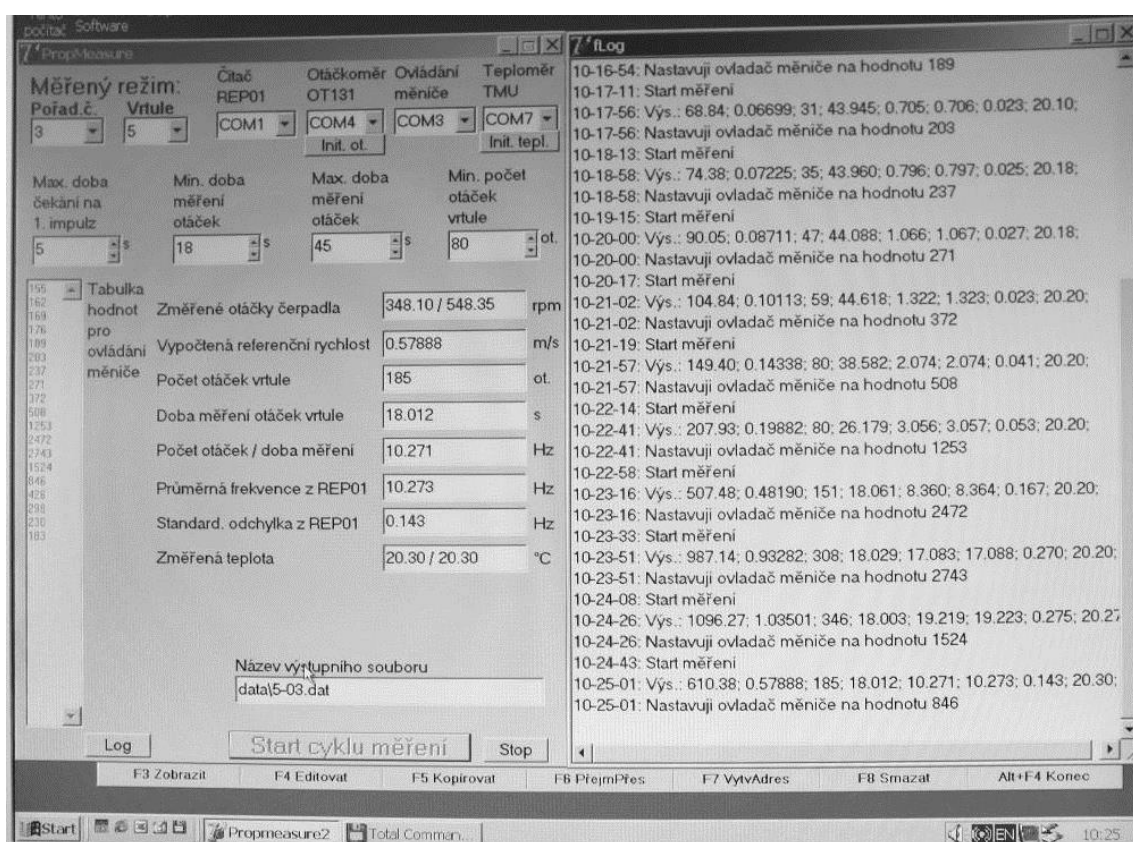
V programu PropMeasure byla nastavena:

- maximální dobu čekání na 1. impulz: 5 sekund,
- minimální doba měření otáček: 18 sekund,
- minimální počet otáček vrtule: 80 otáček,
- maximální doba měření otáček: 45 sekund.

Tato nastavení se projevovovala následovně: Při velmi nízkých rychlostech proudění, kdy se vrtule nebyla schopna roztočit, se čekalo 5 s a poté byla rychlost proudění zvýšena.

Po roztočení vrtule se načítaly impulzy po dobu 45 s. Jakmile, po zvýšení rychlosti, dosáhl počet impulzů 80, začala se doba čítání s rostoucí rychlostí zkracovat. Při dalším nárstu rychlosti se poté uplatnila podmínka minimální doby čítání impulzů 18 s.

Dále je potřeba zvolit celý kalibrační cyklus tzn. zvolit posloupnost rychlostí proudění v trati, tedy použitých hodnot pro ovládání měniče (bylo použito 12 vzestupů a poté 6 poklesů rychlosti), porty pro připojení jednotlivých ovládaných zařízení a zařízení na přijímání dat z měření a označení právě prováděného kalibračního cyklu. Nastavení programu je vidět na Obr. 5.10. Zbytek měření je již proveden bez dalších zásahů.



Obr. 5.10: Nastavení programu PropMeasure (vlevo) a měřicí protokol (vpravo) [foto: M. JURČOVÁ]

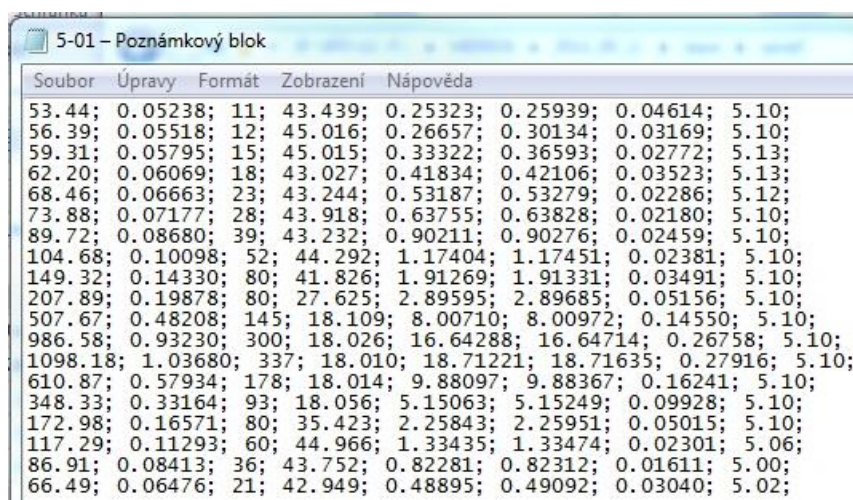
5.1.5. Parametry měření

Měření probíhalo s dvěma různými těly, při dvou různých teplotách. První skupina při 20°C Celsia obsahovala dva měřicí dny na jednu olejovou náplň, v den první proběhly s každým tělem tři pětice kalibračních cyklů a v druhý den vždy dvě pětice cyklů. Poté byla s novou olejovou náplní stejným způsobem naměřena skupina měření při 5°C Celsia. Pro lepší statistickou vypovídací schopnost byl záměr celý proces zopakovat ještě jednou. Druhá skupina, při které byly využity poznatky z měření 1. skupiny, byla rozšířena na čtyři dny měření. V prvním dnu byly naměřeny tři pětice cyklů s oběma těly a v dalších třech dnech bylo naměřeno po dvou pětících cyklů s každým tělem. Po prokázání dobré shody mezi 1. a 2. skupinou testovacích měření při 20°C a malému vlivu snížené teploty, byla od opakování měření při 5°C upuštěno.

5.2. Zpracování naměřených dat

Po změřením všech údajů bylo potřeba vyhodnotit měření. Vyhodnocování probíhalo v programu Microsoft Office 2010 - EXCEL.

Data z programu PropMeasure jsou ukládána v textovém formátu. Byly otevřeny v poznámkovém bloku (Obr. 5.11) a poté vloženy do Microsoft Office 2010 – EXCEL.



5-01 – Poznámkový blok

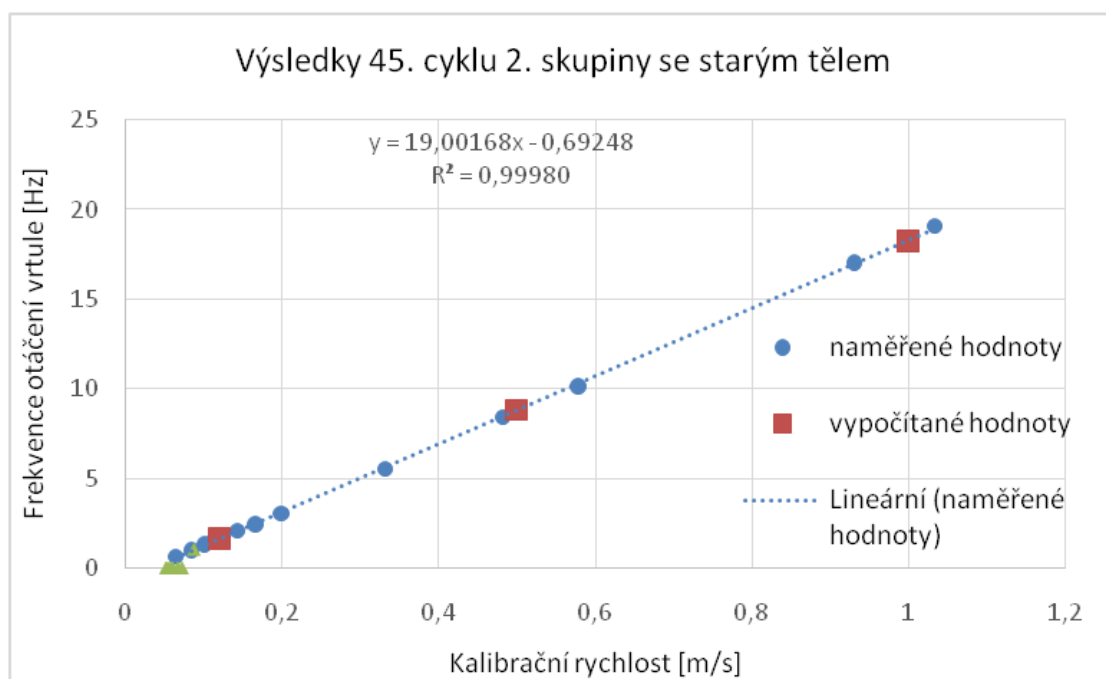
Soubor	Úpravy	Formát	Zobrazení	Nápvěda			
53.44;	0.05238;	11;	43.439;	0.25323;	0.25939;	0.04614;	5.10;
56.39;	0.05518;	12;	45.016;	0.26657;	0.30134;	0.03169;	5.10;
59.31;	0.05795;	15;	45.015;	0.33322;	0.36593;	0.02772;	5.13;
62.20;	0.06069;	18;	43.027;	0.41834;	0.42106;	0.03523;	5.13;
68.46;	0.06663;	23;	43.244;	0.53187;	0.53279;	0.02286;	5.12;
73.88;	0.07177;	28;	43.918;	0.63755;	0.63828;	0.02180;	5.10;
89.72;	0.08680;	39;	43.232;	0.90211;	0.90276;	0.02459;	5.10;
104.68;	0.10098;	52;	44.292;	1.17404;	1.17451;	0.02381;	5.10;
149.32;	0.14330;	80;	41.826;	1.91269;	1.91331;	0.03491;	5.10;
207.89;	0.19878;	80;	27.625;	2.89595;	2.89685;	0.05156;	5.10;
507.67;	0.48208;	145;	18.109;	8.00710;	8.00972;	0.14550;	5.10;
986.58;	0.93230;	300;	18.026;	16.64288;	16.64714;	0.26758;	5.10;
1098.18;	1.03680;	337;	18.010;	18.71221;	18.71635;	0.27916;	5.10;
610.87;	0.57934;	178;	18.014;	9.88097;	9.88367;	0.16241;	5.10;
348.33;	0.33164;	93;	18.056;	5.15063;	5.15249;	0.09928;	5.10;
172.98;	0.16571;	80;	35.423;	2.25843;	2.25951;	0.05015;	5.10;
117.29;	0.11293;	60;	44.966;	1.33435;	1.33474;	0.02301;	5.06;
86.91;	0.08413;	36;	43.752;	0.82281;	0.82312;	0.01611;	5.00;
66.49;	0.06476;	21;	42.949;	0.48895;	0.49092;	0.03040;	5.02;

Obr. 5.11: Poznámkový blok s daty - 5. cyklus, 1. sada, 5° Celsia

5.2.1. Stanovení odchylky měření

Naměřená data (kalibrační rychlost, frekvence otáčení vrtule) z jednotlivých kalibračních cyklů byla vložena do grafu a proložena regresní křivkou. Tímto postupem byla získána frekvenční charakteristika vrtule (Obr. 5.12).

Přestože nastavované rychlosti proudění v kalibračních cyklech měly vysokou opakovatelnost, přeci jenom k nezanedbatelným rozdílům docházelo (zřejmě vlivem ohřívání ložisek a ucpávek elektrického motoru a čerpadla). Proto není možno přímo porovnávat vybrané rychlosti proudění. A také z důvodu vyšší přesnosti, abychom nebyli závislí na přesnosti jednotlivých hodnot získaných při jedné rychlosti proudění, ale využili jsme celou zjištěnou charakteristiku vrtule, byly pro následné porovnávání frekvence otáčení vrtule vypočteny ze získaných rovnic frekvenční charakteristiky vrtule.



Obr. 5.12: Příklad vyhodnocení jednoho kalibračního cyklu

Pro regresi, definování frekvenční charakteristiky vrtule, byla zvolena jedna přímka, jako zcela vyhovující pro použité rozpětí rychlostí, příklad na Obr. 5.12. Pomocí získané rovnice regresní přímky byly následně vypočítány frekvence otáčení vrtule pro zvolené rychlosti 0,12, 0,5 a 1 m/s dle vzorce

$$f_{v_i} = a \cdot v_i + b, \quad (5-1)$$

kde

f_{v_i} frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],

v_i zvolená porovnávací rychlost [m/s],

a, b konstanty vycházející z regresní přímky [-].

Tímto postupem byly získány tři reprezentativní hodnoty z jednoho kalibračního cyklu pro další porovnávání.

Pro stanovení odchylky jednotlivých frekvencí otáčení vrtule získaných opakovaným kalibrováním byla vypočítána průměrná frekvence (dle 5-2) z celé skupiny měření pro každou ze tří zvolených rychlostí a byla stanovena procentuální odchylka (dle 5-3) výsledků jednotlivých kalibračních cyklů od celkové průměrné frekvence.

Použité vzorce pro výpočty byly

$$\bar{f}_v = \frac{\sum_{i=1}^n f_{v_i}}{l}, \quad (5-2),$$

kde

f_{v_i} frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],

\bar{f}_v průměrná frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],

l počet hodnot vstupujících do výpočtu [-],

a
$$\Delta f_{v_i} = \left(\frac{f_{v_i}}{\bar{f}_v} - 1 \right) \cdot 100, \quad (5-3)$$

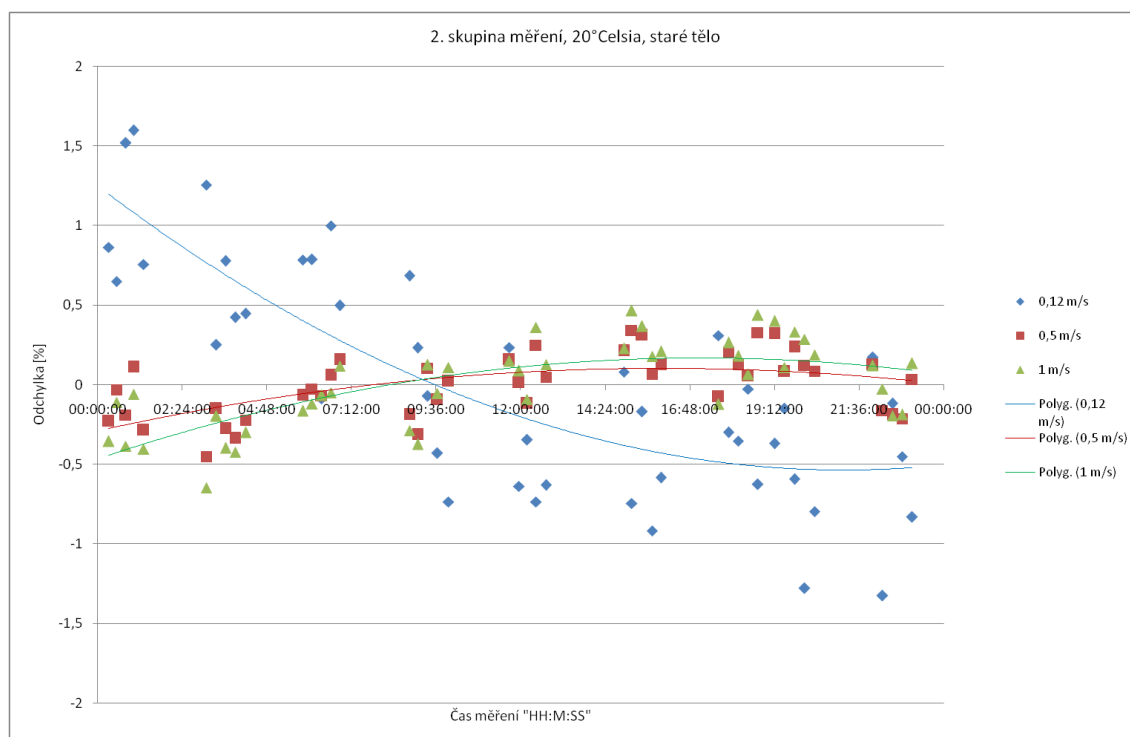
kde

Δf_{v_i} odchylka měření [%],

\bar{f}_v frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],

\bar{f}_{v_i} průměrná frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz].

K jednotlivým odchytkám Δf_{v_i} byly přiděleny časy a hodnoty byly vloženy do grafu. Byly vytvořeny jednotlivé grafy pro všechny skupiny měření např. Obr. 5.13. Zbylé grafy jsou uvedeny jako přílohy A, B, C, D, E, F, G.



Obr. 5.13: 2. skupinaměření při 20°Celsia, staré tělo

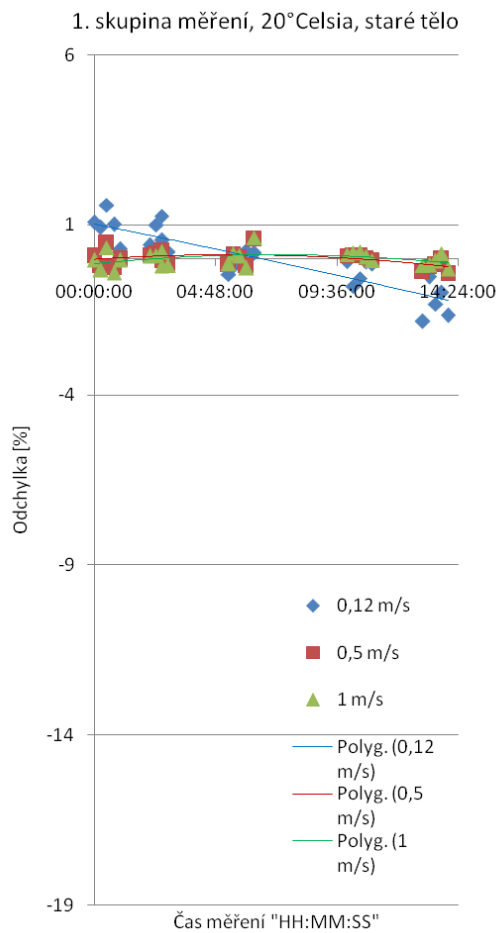
Na základě těchto grafů jsme schopni určit vývoj vlivu nevyměňování olejové náplně při hydrometrování v závislosti na různých podmínkách.

5.1. Vyhodnocení výsledků měření

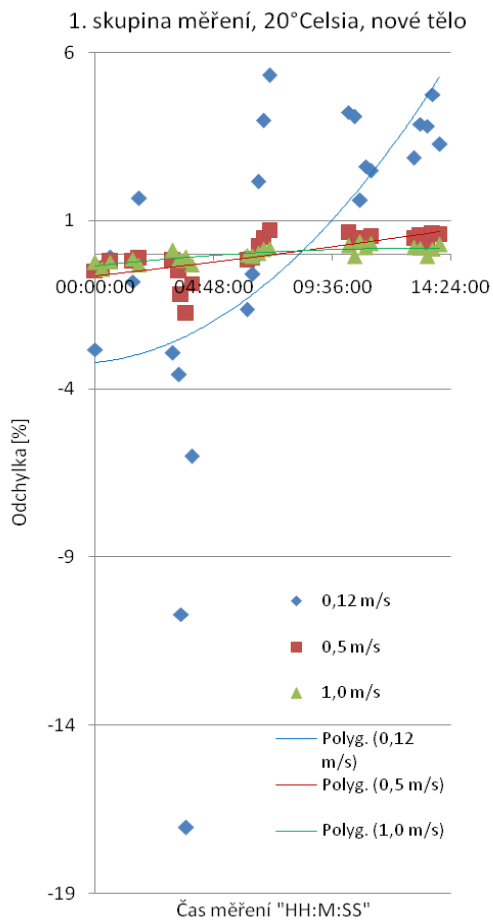
Z celého testování byly vytvořeny grafy, které nejlépe vystihují výsledky z měření, a proto bude v následujícím textu na konkrétních příkladech (vložených skupinách grafů) ukázáno, kde je vliv olejové náplně největší a kde naopak nemá tak velký vliv. Ke každé sadě grafu bude podán komentář, který bude přímo navazovat na umístěné obrázky. Pro další studium jsou všechny grafy v příloze v plné velikosti a označeny písmeny za titulkem obrázku.

Na níže uvedených grafech je možné vidět jeden z prvních výsledků, který byl k dispozici. Na obrázku 5.14 a 5.15 jsou výsledky z první skupiny měření starým a novým tělem při 20°Celsia. Jasným poznatkem je, že těla se liší, dalším důležitým faktem je klesající vliv s rostoucí rychlostí až se stává zanedbatelný. Z výsledků je patrný trend odchylek, který je naznačen regresní křivkou. Velmi důležitá informace vyplývající z těchto grafů je viditelná na obrázcích 5.14 a 5.15, kde je při měření zcela novým tělem vidět výrazně větší rozptyl odchylek oproti starému tělu. Toto je pravděpodobně způsobeno novými ložisky, která potřebují pro přesnější výsledky určitý čas na zajištění. Tento jev bude více patrný v následujícím textu z výsledků druhé skupiny měření (Obr. 5.16 a 5.17), kde již došlo k zajištění nového těla a tím pádem i k méně rozptýleným výsledkům měření. Ale i bez dalších výsledků je vidět, že v průběhu měření dochází k ustalování odchylky. Na obrázku 5.14 je vidět, že odchylky na starém těle jsou hned od počátku měření v mezích $\pm 2\%$, což je relativně malý vliv na hydrometrovací proces. I na starém těle je vidět jasný trend, kde při zvyšující se rychlosti je rozptyl odchylek mnohem menší, naopak při rychlosti 0,12 m/s je rozptyl odchylek výrazně vyšší. Další výraznou informací je trend vývoje odchylek při vyšších rychlostech. Na obrázku 5.14 při měření starým tělem odchylky oscilují okolo 0% a spíše klesají do záporných hodnot, bohužel tento trend není dostatečně postihnut, a proto při měření druhé skupiny byl počet změřených cyklů navýšen. Naopak na obrázku 5.15 při měření novým tělem mají všechny rychlosti vzrůstající trend odchylek. Na základě těchto výsledků, jak už bylo řečeno, bylo rozhodnuto ve druhé skupině naměřit více kalibračních cyklů, aby byl jasněji vidět vzniklý trend. Jeden z posledních významných faktů patrný z grafu na obrázku 5.15 jsou „úlety“ způsobené zřejmě

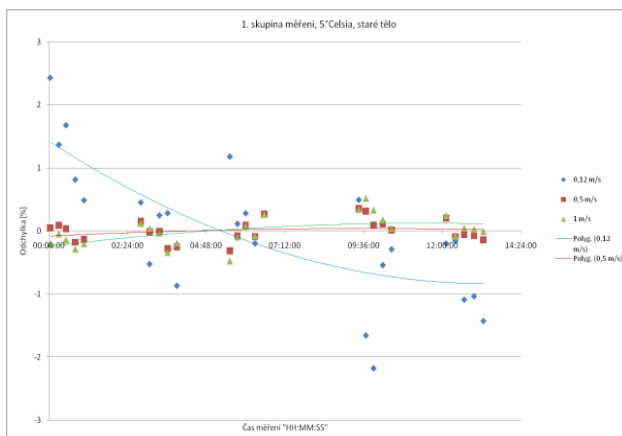
zaschlou kapkou vody u výstupu hřidelky z těla, což je velké varování pro uživatele i pro nás, abychom tomuto věnovali větší pozornost v dalších pokusech.



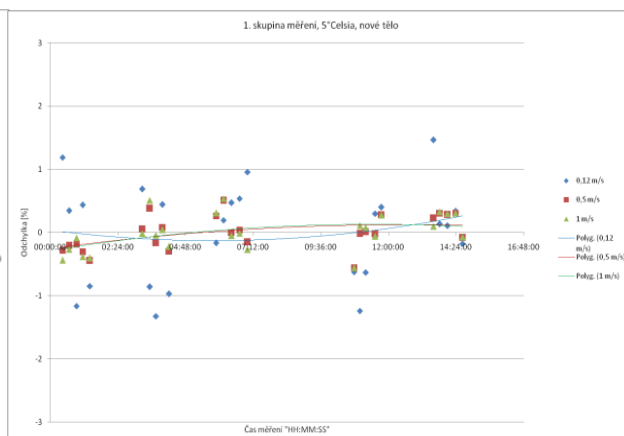
Obr. 5.14: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A. C)



Obr. 5.15: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B, D)

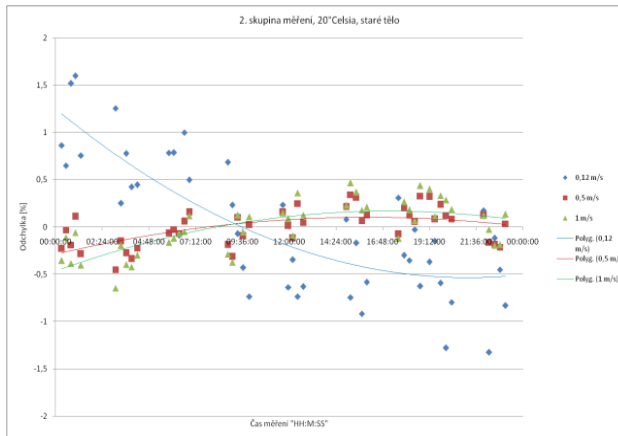


Obr. 5.16: 1. skupina měření, 5°Celsia, staré tělo (Příloha G)



Obr. 5.17: 1. skupina měření, 5°Celsia, nové tělo (Příloha H)

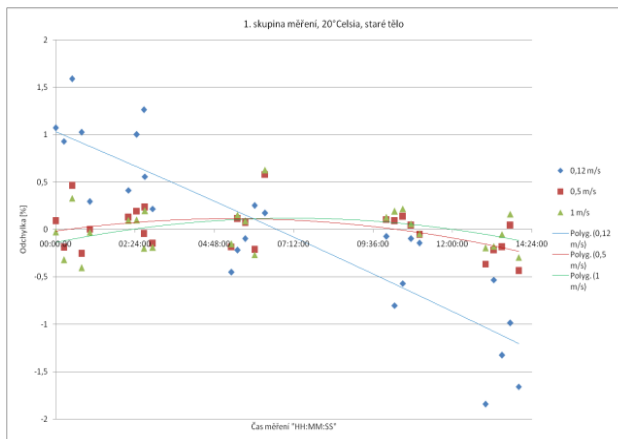
Další variantou testování bylo měření při teplotě 5°Celsia (Obr. 5.16 a 5.17). U obou těl se odchylky pohybují v rozmezí $\pm 3\%$, které jsou sice mírně vyšší než u měření při 20°Celsia, ale trend je podobný. Rozdíl mezi těly je pouze při nejnižší rychlosti. Rychlosti 0,5 a 1,0 m/s mají téměř totožný trend.



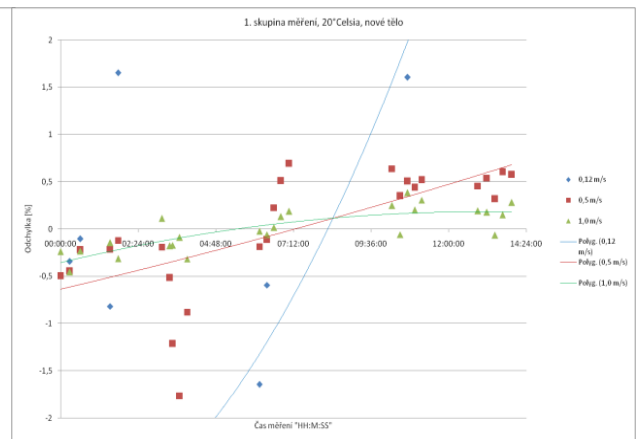
Obr. 5.18: 2. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha E)



Obr. 5.19: 2. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha F)



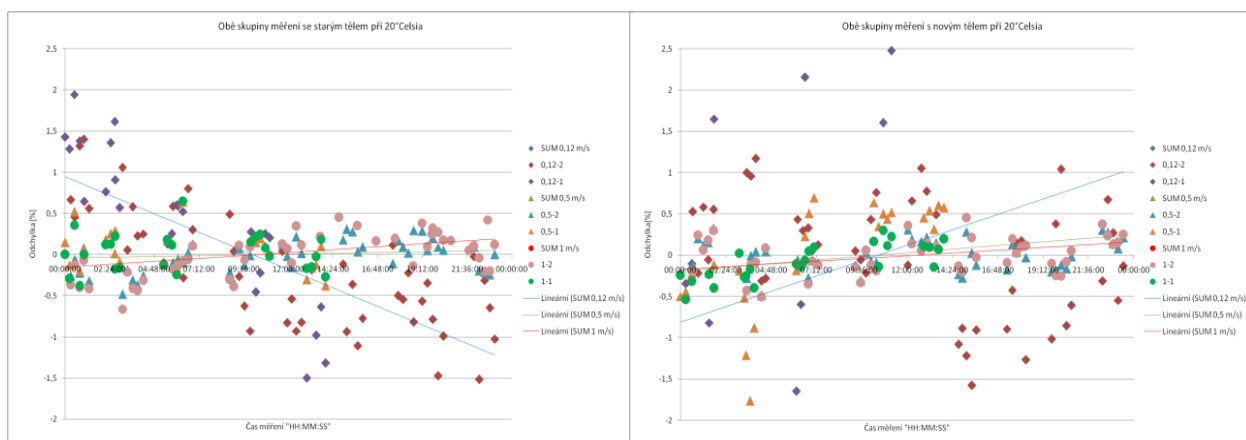
Obr. 5.20: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A)



Obr. 5.21: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B)

Na skupinu první přímo navázalo měření druhé skupiny při 20°Celsia, které potvrdilo správnost měření první skupiny a nijak nevyvrátilo již zjištěné trendy, naopak poskytlo další cenné informace, které umožnily podrobnější pohled na celou problematiku. V této sérii vznikl v obou případech podobný trend u všech tří rychlostí, kdy rychlosti 0,5 a 1,0 m/s oscilují kolem nulové osy, ovšem převážně v kladných hodnotách odchylky a trend v rychlosti 0,12 m/s je jasně klesající. Na obrázku 5.19 je vidět zajištění nového těla, které mělo za sebou již měření první skupiny při teplotě 20° i 5°Celsia. Výsledky jsou v tomto případě vyváženější a odchylka měření nepřesahuje $\pm 2\%$ stejně jako při měření starým tělem (Obr. 5.18). Pro lepší srovnání jsou výše vloženy grafy 1. skupiny měření (Obr. 5.20 a 5.21), kde jsou vidět důvody ke změnám v druhé sérii testování.

Další zajímavé informace získáme vytvořením společného grafu pro obě skupiny měření při 20°Celsia (Obr. 5.22 a 5.23).

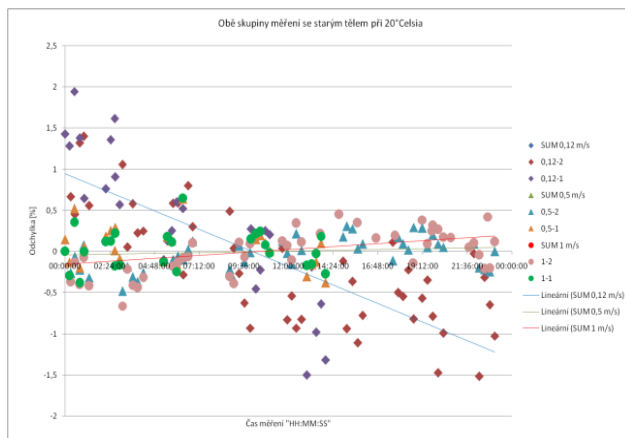


Obr. 5.22: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia (Příloha I)

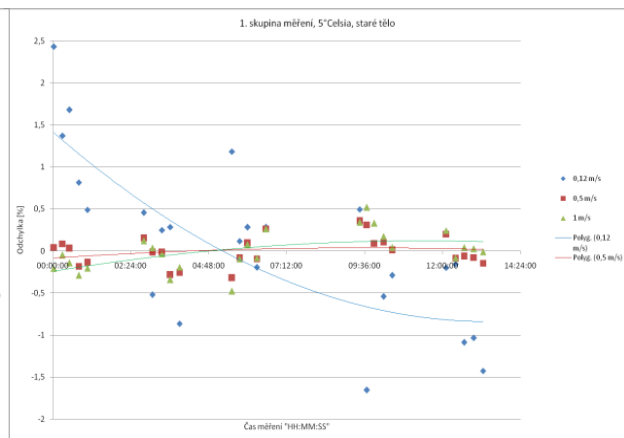
Obr. 5.23: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia (Příloha J)

Jak je vidět při porovnání výše uvedených grafů je zde minimální rozdíl ve vývoji regresní křivky při rychlostech 0,5 a 1,0 m/s. Drží se ve velmi nízkých odchylkách a zároveň se trend vyvíjí stejným směrem. Naopak při rychlosti 0,12 m/s je zde patrný značný rozdíl ve směru regresní křivky. Po uvážení vlivů, jež působí na vrtuli při samotném měření, je to možná způsobeno nejen samotnou olejovou náplní, kde vzniklá emulze může ovlivňovat vlastnosti vrtule, ale i stav ložisek a hřídelky, případně i mikroskopické částičky, které mohou při měření uvíznout v mezeře mezi hřídelkou a tělem.

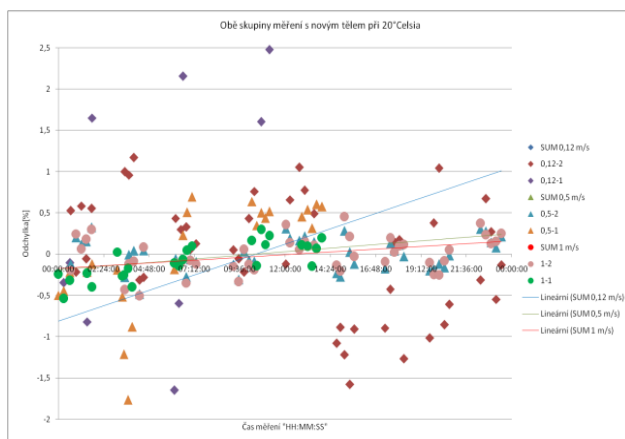
V případě, že dojde ke srovnání celkových grafů pro 20°Celsia a pro 5°Celsia (Obr. 5.24 až 5.27), je zde opět jasně patrný trend, tzn. podobné odchylky při měření se starým tělem a při měření tělem novým je zde rozdíl opět pouze při nízkých rychlostech, což je dáno značnou nestejnorodostí hodnot.



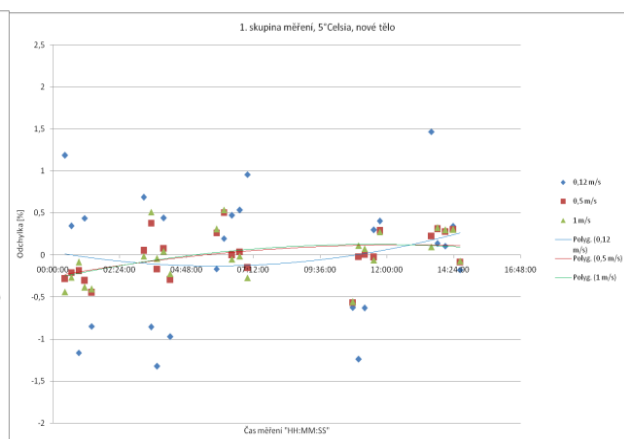
Obr. 5.24: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia (Příloha I)



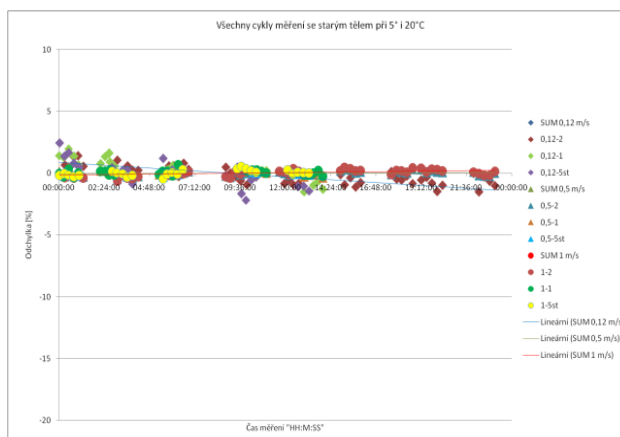
Obr. 5.25: 1. skupina měření, 5°Celsia, staré tělo (Příloha G)



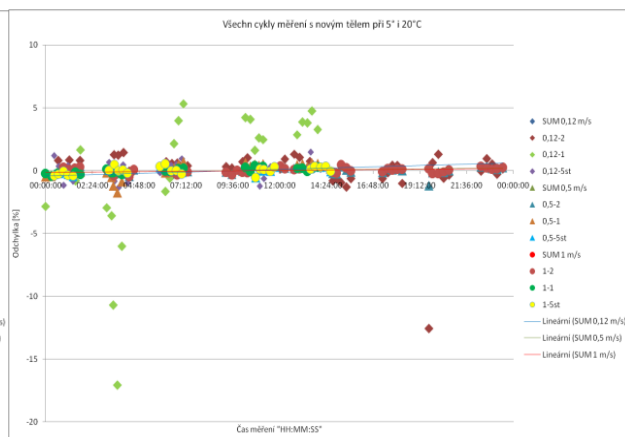
Obr. 5.26: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia (Příloha J)



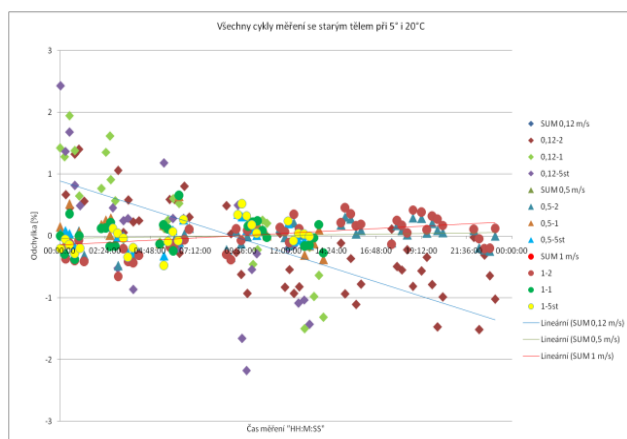
Obr. 5.27: 1. skupina měření, 5°Celsia, nové tělo (Příloha H)



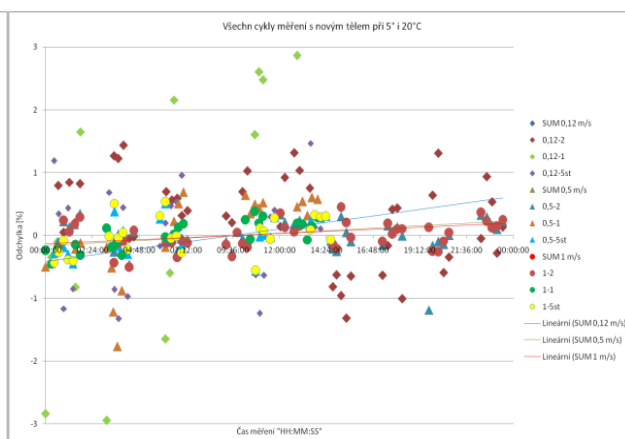
Obr. 5.28: Všechny cykly měření se starým tělem při 5° i 20°C (Příloha K)



Obr. 5.29: Všechny cykly měření s novým tělem při 5° i 20°C (Příloha L)

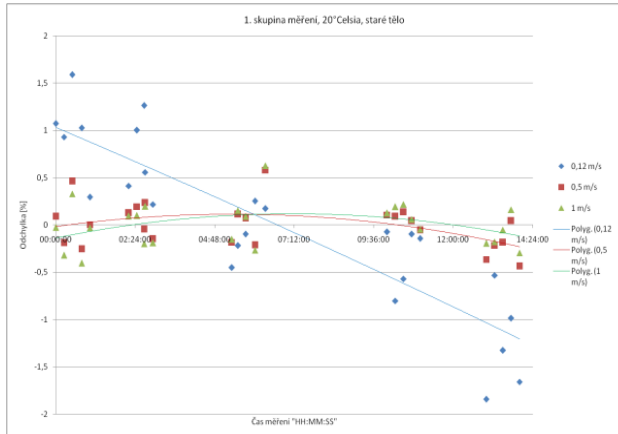


Obr. 5.30: Všechny cykly měření se starým tělem při 5° i 20°C (Příloha M)

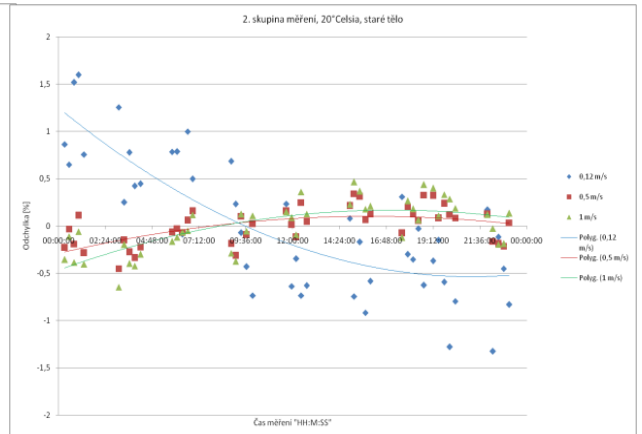


Obr. 5.31: Všechny cykly měření s novým tělem při 5° i 20°C (Příloha N)

Výstupy v grafu při všech teplotách jsou viditelně ovlivněny prvotními velkými odchylkami při počátečním měření s novým tělem (Obr. 5.28 a 5.29). Ovšem názornější pohled je při zanedbání velkých odchylek a zaměření se na většinové hodnoty v rozptylu odchylek $\pm 3\%$ (Obr. 5.30 a 5.31), kdy je opět viditelný podobný trend při rychlostech 0,5 a 1,0 m/s. Při nejnižší rychlosti je však obrácený trend vůči měření se starým tělem.

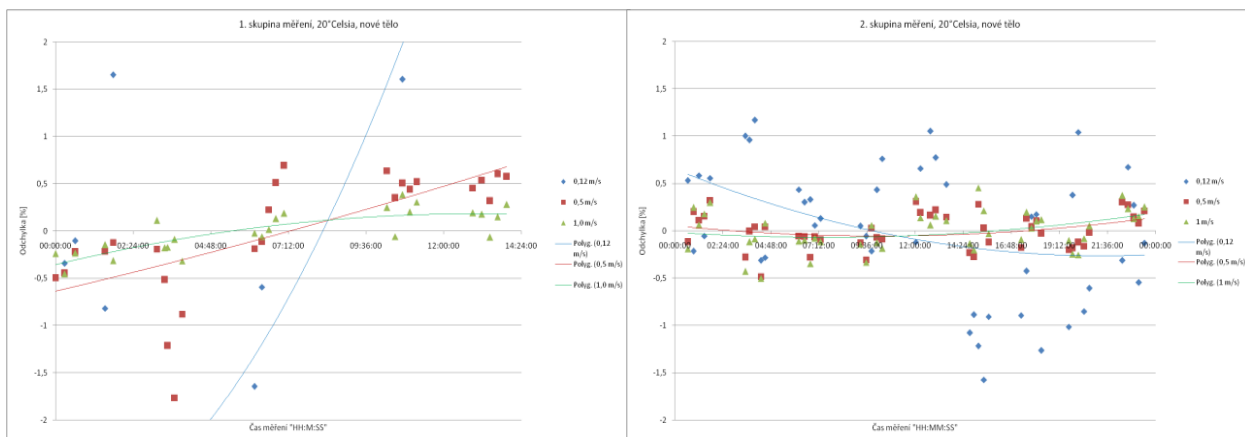


Obr. 5.32: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A)



Obr. 5.33: 2. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha E)

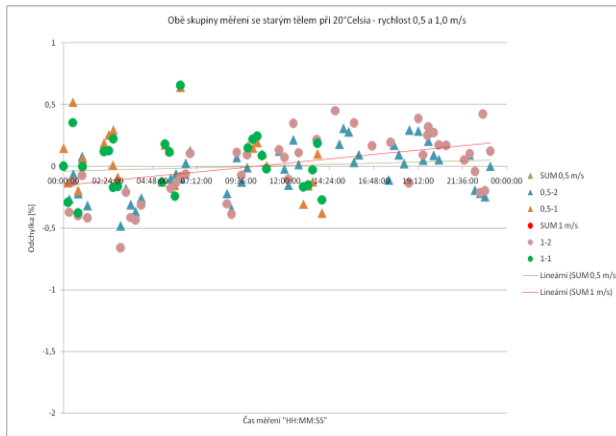
Při porovnávání měření se stejným, tedy starým, tělem (Obr. 5.32 a 5.33) je vidět velmi podobný vývoj trendu, který je v druhé skupině umocněn dalšími kalibračními cykly, které potvrzují jeho vývoj. Je zde jasně viditelné, že počáteční změny v odchylce jsou v daných poměrech relativně výrazné, avšak s prodlužující se dobou měření dochází k ustálení a v dalším průběhu testování se již v průměru odchylky nemění.



Obr. 5.34: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B)

Obr. 5.35: 2. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha F)

V návaznosti na porovnávání starého těla, obdobně porovnáme i nové tělo (Obr. 5.34 a 5.35), zde však pro větší přehlednost byly použity grafy s upravenou odchylkou omezenou $\pm 2\%$, aby vynikly požadované informace. Nejprve je zde vidět vliv nezajetého, tzn. zcela nového těla při měření v první skupině, kde je vidět velký rozptyl odchylek, především při nízkých rychlostech. Ale je zde vidět mírně odlišný trend i při rychlostech 0,5 a 1,0 m/s. Ale je důležité všimnout si především stejných směrů trendu, lišícího se pouze v nejnižších rychlostech, jak už bylo zmíněno i při jiných dvojicích grafů.

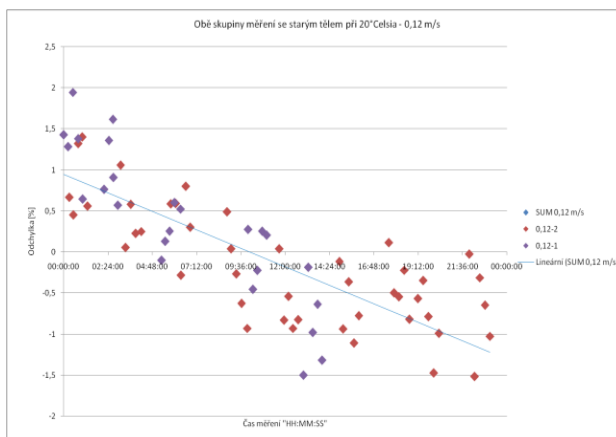


Obr. 5.36: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia – rychlost 0,5 a 1,0 m/s (Příloha O)

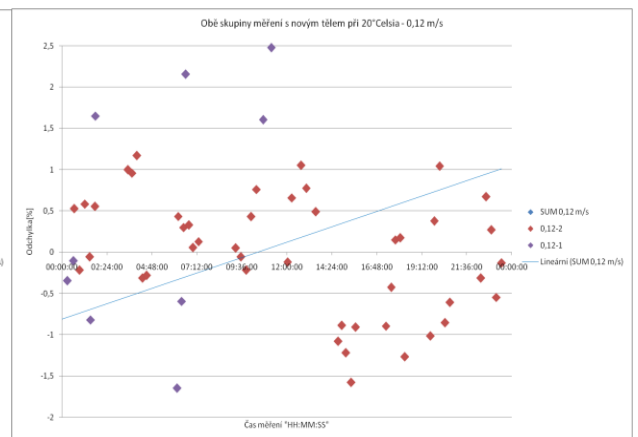


Obr. 5.37: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia – rychlost 0,5 a 1,0 m/s (Příloha P)

Při porovnání obou skupin měření při 20°Celsia v grafech pouze s rychlostmi 0,5 a 1,0 m/s (Obr. 5.36 a 5.37) je vidět velmi obdobné výsledky obou těl, které se liší jen v občasných „úletech“ způsobených neznámými vlivy.

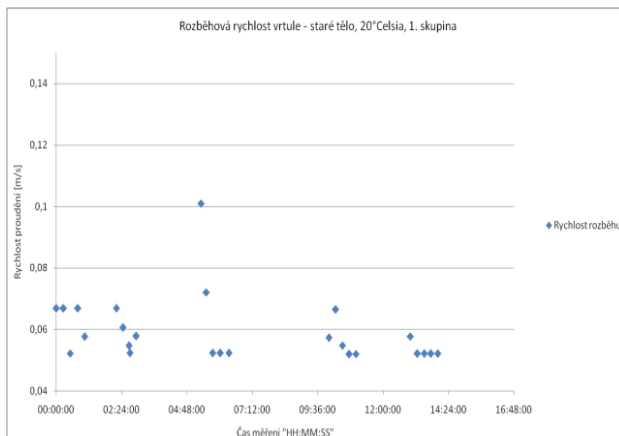


Obr. 5.38: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia – 0,12 m/s (Příloha Q)

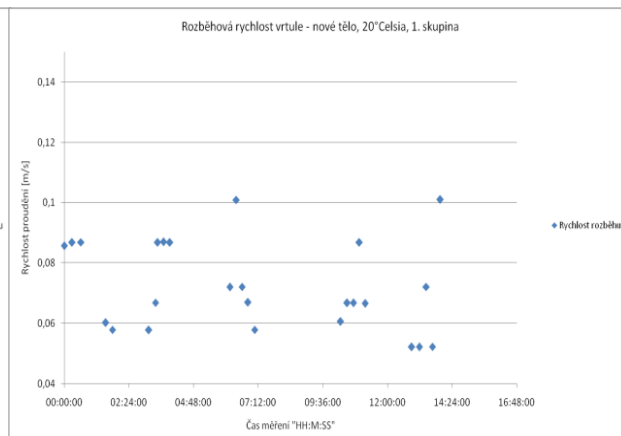


Obr. 5.39: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia – 0,12 m/s (Příloha R)

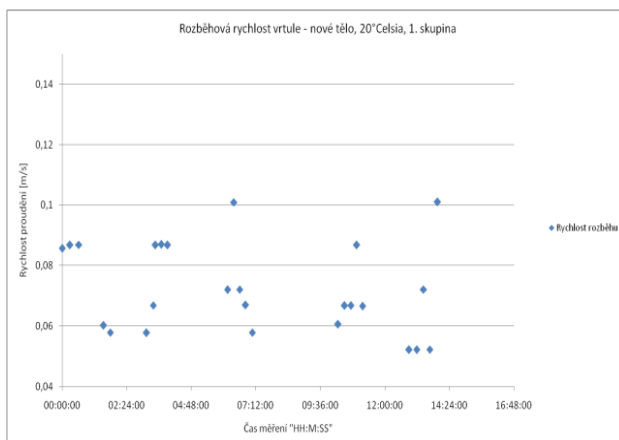
Nejvíce odlišností najdeme při porovnání grafů s nejnižší rychlostí 0,12 m/s při 20°Celsia (Obr. 5.38 a 5.39). Při zvolení stejného měřítka je zřetelně vidět větší rozptyl bez jasně daného trendu při měření novým tělem, tento výsledek je ovlivněn hlavně počátečními hodnotami z první skupiny měření. Naopak hodnoty z měření starým tělem tvoří jasně vymezený pás hodnot, který je vyjádřen regresní křivkou v opačném směru, než je směr při měření tělem novým. Je zde tedy jasně vidět jiný vliv olejové náplně na různě stará těla hydrometrovací vrtule.



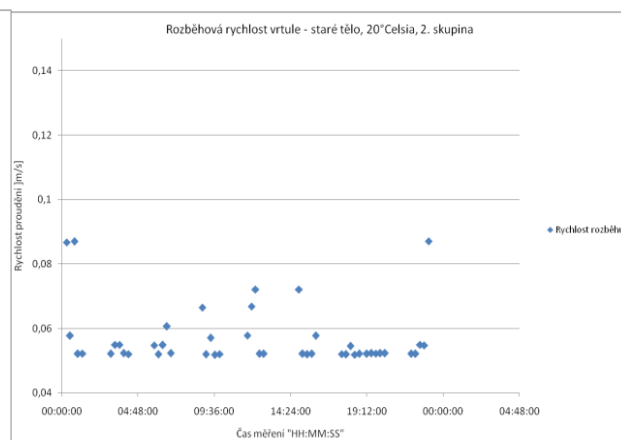
Obr. 5.40: Rozběhová rychlost – staré tělo, 20°Celsia, 1. skupina (Příloha S)



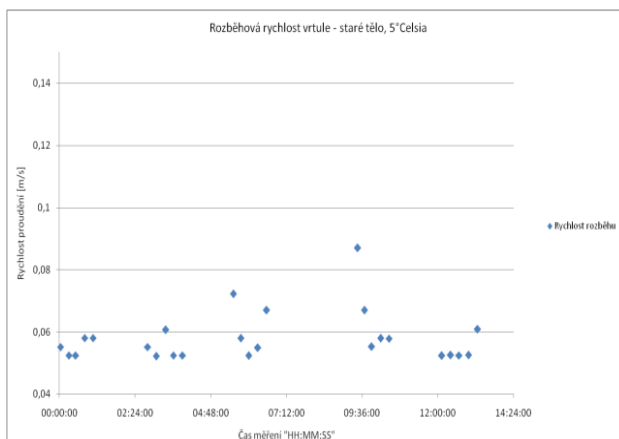
Obr. 5.41: Rozběhová rychlost – nové tělo, 20°Celsia, 1. skupina (Příloha T)



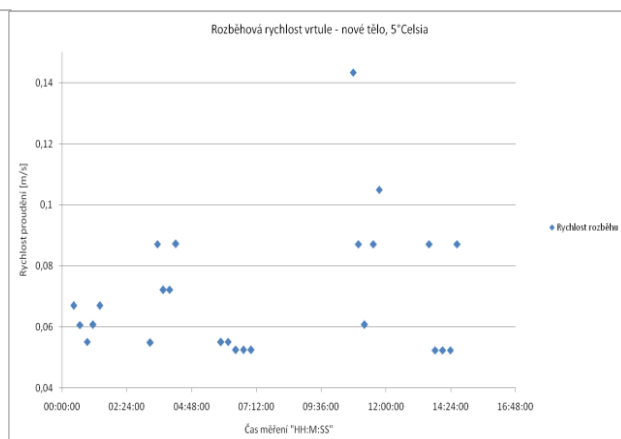
Obr. 5.42: Rozběhová rychlost – staré tělo, 20°Celsia, 2. skupina (Příloha W)



Obr. 5.43: Rozběhová rychlost – nové tělo, 20°Celsia, 2. skupina (Příloha X)



Obr. 5.44: Rozběhová rychlost – staré tělo, 5°Celsia (Příloha Y)



Obr. 5.45: Rozběhová rychlost – nové tělo, 5°Celsia (Příloha Z)

Posledním ukazatelem důležitosti výměny olejové náplně v tělech vrtule je rozběhová rychlost – rychlost proudění, při které se stojící vrtule začne otáčet, ta zřejmě není ovlivněna pouze suspenzí vznikající mísením oleje a vody, ale také stavem ložisek

v těle vrtule, nečistotami v měřené vodě a dalšími neznámými vlivy. Vezmeme-li v úvahu, že jsem se v průběhu celého testování snažila o důsledné odstraňování zbytkových kapek vody v okolí výstupu hřídelky z těla v průběhu měření a celé testování probíhalo v dostatečně čisté vodě, je zde tento parametr pravděpodobně ukazatelem vlivu olejové náplně. Jak je tedy možné vidět (Obr. 5.40 až 5.45), největší rozptyl nastával při měření první skupiny s novým tělem vrtule, toto již bylo zmíněno výše, a také při měření v teplotě 5°Celsia, což může být způsobeno jednak změnou viskozity olejové náplně ale také změnou vůlí mezi součástkami těla vrtule. Také je zde jasně vidět problematický rozběh vrtule v prvních kalibračních cyklech každé pětice. Po delším nepřetržitém provozu se téměř vždy rozběhová rychlost sníží. Toto poukazuje na potřebu „rozhýbání“ vrtule po klidovém stavu.

A také je zřejmé, že jev, který bychom mohli nazvat „zatuhnutí“ vrtule během pobytu na vzduchu se s prodlužující dobou provozu (bez výměny oleje) zvětšuje.

Pro podrobnější zhodnocení vlivu olejové náplně na rozběhovou rychlost vrtule by bylo zapotřebí dalšího výzkumu, který překračuje rámec této diplomové práce.

5.2. Provozní náklady za olej

Motivace celého výzkumu byla především v zjištění chyb vznikajících při měření s tělem, kde se nevyměňuje pravidelně olej. Ovšem v průběhu měření se naskytla možnost zvážit, zda je vzhledem k chybám, které provází nevyměňování oleje možné snížit náklady na pořizování oleje, či se náklady zvýší častějším vyměňováním ložisek v těle z důvodu vyššího opotřebení z nedostatku dostatečně kvalitní olejové náplně.

Pro stanovení běžné životnosti ložisek v těle vrtule by byl potřebný mnohem delší výzkum, který by mohl jasně poukázat, jaký vliv má stará olejová náplň nejen při měření, ale také na technický stav celého zařízení.

Dle ceníku OTT 02/2012 dodaného p. Robertem Berným z f. Hydrometrics je cena na pořízení celé základní sady pro hydrometrování 7211,1 €. V případě opotřebení těla vrtule bude cena za nákup těla nového 748,2 €. Náklady na nářadí s 0,1 l oleje je 64,5 €. To znamená, že na nákup nového těla je potřeba, aby obsluha ušetřila 829 vyměnění olejové náplně. V případě, že by došlo k měření třikrát týdně a výměna oleje by proběhla pouze na začátku týdne, pak by se nám náklady na jedno tělo vrátily zhruba po osmi letech. Další možností je výměna pouze hřídelky s ložisky, tato varianta je levnější (přibližně 2/3 ceny celého těla), ne však zásadně. Je tedy otázkou v závislosti na nyní neznámých životnostech celého těla, zda není z hlediska udržení dobrého technického stavu lepší spíše pro jistotu měnit olejovou náplň v intervalech co nejkratších, případně v jakých to dovolují pracovní podmínky.

6. ZÁVĚR

Na základě výsledků zmíněných v kapitolách 5.3. a 5.4. jsme schopni prohlásit, že olejová náplň může mít vliv na chybu měření. V oblasti velmi nízkých rychlostí (v řádu cm/s) se chyba pohybuje v jednotkách procent (zde jsou odporové síly poměrně větší, než u rychlostí vyšších, a tudíž se každá menší změna v těle vrtule více projeví). Při vyšších rychlostech proudění se chyba pohybuje v desetinách procent. Dalším důležitým zjištěním je i to, že čerstvě vyměněný olej má podobný vliv na chybu měření jako olej starý, proto doporučuji olejovou náplň, i v závislosti na ceně oleje, pravidelně měnit dle současných zvyklostí, avšak je vhodné před vlastním měřením nebo kalibrováním nechat vrtuli několik desítek minut „zaběhnout“. Jedním ze závěrů (a možná nejdůležitějším) je varování před možností vzniku chyby v řádu až desítek procent z důvodu zaschlé zbytkové kapky vody v místě výstupu hřídelky z těla hydrometrovací vrtule. Také je důležité si uvědomit, že omezením frekvence výměny olejové náplně v těle vrtule může dojít k nenávratnému poškození ložisek a samotného těla, což nedokáže ekonomicky vyvážit snížená potřeba olejové náplně (viz kapitola 5.4.)

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KŘÍŽ, Vladislav et al. *Hydrometrie*. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1988, 176 s. 14-512-88.
- [2] ČSN ISO 2537. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [3] ČSN EN ISO 748. Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [4] ČSN EN ISO 772 (259300). *Hydrometrická měření – Terminologie*. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [5] BOOR, Boris, Jiří KUNŠTÁTSKÝ a Cyril PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1968.
- [6] Hydrometrické vrtule. In: *Výzkumný ústav vodohospodářský TGM: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí* [online]. [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://cksvv.vuv.cz/hydrometricke-vrtule>
- [7] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: Modul 01*. Brno: CERM, 2006.
- [8] ŽOUŽELA, Michal. Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných proudových poměrech s volnou hladinou: disertační práce k získání akademického titulu Doktor (Ph.D.) ve studijním programu (oboru) Vodní hospodářství a vodní stavby 36-35-9. Brno: Vysoké učení technické, 2005. 105 s., il.,. Disertační práce. VUT, FAST, Ústav vodních staveb, Laboratoř vodohospodářského výzkumu.

- [9] ČSN 25 9312. Měření průtoků kapalin v korytech, Metody rychlostního pole, Zjišťování celkové chyby. Praha: Český normalizační institut, 11/1994.
- [10] PALENČÁŘ, Rudolf. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2001, 7-8, s. 5 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>
- [11] TUREČEK, Jan. Stanovení Coriolisova kritéria v otevřeném korytě. *Vysoké učení technické, Fakulta stavební* [online]. s. 5 [cit. 2013-05-14]. Dostupné z: http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/03_Vodni%20hospodarstvi%20a%20vodni%20stavby/3_01_Vodni%20hospodarstvi%20a%20vodni%20stavby/Turecek_Jan.pdf
- [12] BUCHTA, Pavel. *Strojně-technologický návrh zkušební trati vodoměrných vrtulí*. Brno, 2012. 41 s., 11 příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
- [13] BĚM, Jiří. [online]. [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydraulika/Hydraulika/Predmety/Hya/ke_stazeni/Historie.pdf
- [14] Hydrometrické vrtule. In: Česká kalibrační stanice vodoměrných vrtulí [online]. [cit. 2015-01-10]. Dostupné z: <http://cksvv.vuv.cz/index.php?id=490>

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$f(u_i)$	je funkce rychlostního pole.
b_i	šířka svislicového pásu,
h_i	hloubka svislicového pásu,
\bar{v}_i	průměrná rychlost na svislici,
m	počet svislicových pásů.
u	je rychlost proudu,
n_f	je frekvence otáček
α, β	jsou konstanty uvedené v kalibračním listu vodoměrné vrtule,
C	je rychlostní součinitel,
R	je hydraulický poloměr,
i	je sklon čáry energie,
S	je průtočná plocha,
O	je omočený obvod.
n	je drsnostní součinitel,
R	je hydraulický poloměr
n_i	je dílčí drsnostní součinitele,
O_i	je dílčí omočené obvody,
v	je rychlost proudění kapaliny,

S	je plocha průřezu,
Q	je průtočné množství.
n	nezávislých stejně přesných pozorování
k	je součinitel ze zákona rozdělení, kterým se příslušný zdroj nejistoty řídí.
u_{Bzj}	jsou nejistoty jednotlivých zdrojů,
A_j	jejich součinitele citlivosti.
$u(Q)$	je relativní kombinovaná standardní nejistota průtoku,
$u_{b,i}$ $u_{d,i}$ $u_{\bar{v},i}$	jsou relativní standardní nejistoty [%] šířky, hloubky a průměrné rychlosti měřených na svislici i ,
u_s	nejistota způsobená nestálou odezvou vodoměrné vrtule (u_{cm}), měřiče šířky (u_{bm}) a hloubky sondou (u_{ds}).
u_m	nejistota způsobená omezeným počtem svislic a
m	počet svislic.
$u_{p,i}^2$	nejistota průměrné rychlosti \bar{v}_i způsobená omezeným počtem hloubek, v nichž jsou provedena měření na svislici i ;
n_i	počet hloubek na svislici i , v nichž jsou provedena měření rychlosti;
$u_{c,i}$	nejistota rychlosti při zvláštním bodu měření na svislici i způsobená nedostatkem reprodukce vodoměrné vrtule,

$u_{e,i}$	nejistota bodové rychlosti ve zvláštní hloubce na svislici i způsobená fluktuacemi rychlosti (pulzacemi) v proudu během doby expozice vodoměrné vrtule.
v_i	zvolená porovnávací rychlost [m/s],
a, b	konstanty vycházející z regresní přímky [-].
f_{v_i}	frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],
\bar{f}_v	průměrná frekvence otáčení vrtule při zvolené rychlosti [Hz],
l	počet hodnot vstupujících do výpočtu [-],
Δf_{v_i}	odchylka měření [%].

9. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Původní Woltmannova vrtule [14]	15
Obr. 2.2: Vrtule typu OTT-C2 [foto: M. JURČOVÁ]	15
Obr. 2.3: Priceova vrtule[14]	16
Obr. 2.4: Konstrukce vrtule typu OTT-C2 [firemní prospekt OTT].....	17
Obr. 5.1: Testovací okruh [foto: M. JURČOVÁ]	32
Obr. 5.2: Nové tělo při ustavování do správné pozice pomocí speciálního přípravku [foto: M. JURČOVÁ]	33
Obr. 5.3: Staré tělo připravené k testování [foto: M. JURČOVÁ]	33
Obr. 5.4: Schéma měrného okruhu	34
Obr. 5.5: Odstředivé čerpadlo s nezávislým chlazením [foto: M. JURČOVÁ].....	35
Obr. 5.6: Teploměr k přímému sledování teploty [foto: M. JURČOVÁ].....	36
Obr. 5.7: Měrný prostor[foto: M. JURČOVÁ]	36
Obr. 5.8: Čítač impulzů REP 01 s možností připojení k počítači [foto: M. JURČOVÁ]	37
Obr. 5.9: Externí chladicí zařízení s ovládací jednotkou [foto: M. JURČOVÁ].....	38
Obr. 5.10: Nastavení programu PropMeasure (vlevo) a měřící protokol (vpravo) [foto: M. JURČOVÁ]	39
Obr. 5.11: Poznámkový blok s daty - 5. cyklus, 1. sada, 5° Celsia	40
Obr. 5.12: Příklad vyhodnocení jednoho kalibračního cyklu	41

Obr. 5.13: 2. skupinaměření při 20°Celsia, staré tělo	43
Obr. 5.14: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A, C).....	45
Obr. 5.15: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B, D).....	45
Obr. 5.16: 1. skupina měření, 5°Celsia, staré tělo (Příloha G).....	46
Obr. 5.17: 1. skupina měření, 5°Celsia, nové tělo (Příloha H)	46
Obr. 5.18: 2. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha E).....	47
Obr. 5.19: 2. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha F).....	47
Obr. 5.20: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A).....	47
Obr. 5.21: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B).....	47
Obr. 5.22: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia (Příloha I)	48
Obr. 5.23: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia (Příloha J).....	48
Obr. 5.24: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia (Příloha I)	49
Obr. 5.25: 1. skupina měření, 5°Celsia, staré tělo (Příloha G).....	49
Obr. 5.26: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia (Příloha J).....	49
Obr. 5.27: 1. skupina měření, 5°Celsia, nové tělo (Příloha H)	49
Obr. 5.28: Všechny cykly měření se starým tělem při 5° i 20°C (Příloha K).....	50
Obr. 5.29: Všechny cykly měření s novým tělem při 5° i 20°C (Příloha L).....	50
Obr. 5.30: Všechny cykly měření se starým tělem při 5° i 20°C (Příloha M)	50
Obr. 5.31: Všechny cykly měření s novým tělem při 5° i 20°C (Příloha N)	50
Obr. 5.32: 1. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha A).....	51

Obr. 5.33: 2. skupina měření, 20°Celsia, staré tělo (Příloha E).....	51
Obr. 5.34: 1. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha B).....	52
Obr. 5.35: 2. skupina měření, 20°Celsia, nové tělo (Příloha F).....	52
Obr. 5.36: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia – rychlost 0,5 a 1,0 m/s (Příloha O).....	53
Obr. 5.37: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia – rychlost 0,5 a 1,0 m/s (Příloha P)	53
Obr. 5.38: Obě skupiny měření se starým tělem při 20°Celsia – 0,12 m/s (Příloha Q)..	53
Obr. 5.39: Obě skupiny měření s novým tělem při 20°Celsia – 0,12 m/s (Příloha R)....	53
Obr. 5.40: Rozběhová rychlost – staré tělo, 20°Celsia, 1. skupina (Příloha S)	54
Obr. 5.41: Rozběhová rychlost – nové tělo, 20°Celsia, 1. skupina (Příloha T).....	54
Obr. 5.42: Rozběhová rychlost – staré tělo, 20°Celsia, 2. skupina (Příloha W).....	54
Obr. 5.43: Rozběhová rychlost – nové tělo, 20°Celsia, 2. skupina (Příloha X).....	54
Obr. 5.44: Rozběhová rychlost – staré tělo, 5°Celsia (Příloha Y)	54
Obr. 5.45: Rozběhová rychlost – staré tělo, 5°Celsia (Příloha Z).....	54