

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**POSOUZENÍ VYBRANÝCH METROLOGICKÝCH  
CHARAKTERISTIK MĚŘIDEL BODOVÉ RYCHLOSTI  
VODNÍHO PROUDU VYUŽÍVAJÍCÍ  
ELEKTROMAGNETICKÉHO PRINCIPU MĚŘENÍ**

METROLOGICAL CHARACTERISTICS OF CURRENT VELOCITY METERS USING THE  
ELECTROMAGNETIC PRINCIPLE OF MEASUREMENT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Bc. Martin Vítů

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Martin Vítů
<b>Název</b>	Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2020
<b>Datum odevzdání</b>	15. 1. 2021

V Brně dne 31. 3. 2020

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Diplomant se u několika typů elektromagnetických měřidel bodové rychlosti zaměří na posouzení směrové citlivosti a přesnosti měření (stanovení nejistoty bodové rychlosti) v poměrech simulujících podmínky reálných měrných profilů. Získané výsledky porovná s parametry udávanými výrobcí a s odpovídajícími metrologickými charakteristikami vodoměrných vrtulí. Práce bude obsahovat textovou, tabelární a grafickou část.

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

- [1] ČSN ISO EN 772. Hydrometrická měření – Terminologie. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2012
- [2] ČSN EN ISO 748. Hydrometrie – Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí a plováků. Český normalizační institut, Praha 2001 a 2008
- [3] ČSN ISO 2537. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem. Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Český normalizační institut, Praha 1993
- [4] ISO/TS 15768. Measurement of liquid velocity in open channels - Design, selection and use of electromagnetic current meters. Geneva 2000
- [5] ISO 3455. Hydrometry - Calibration of current-meters in straight open tanks. Geneva 2007
- [6] MP 010 Metrologický přepis – Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou. Český metrologický institut, Brno 2018
- [7] OTT Hydromet GmbH: <http://www.ott.com/de-de/produkte/download/white-paper-ott-mfpro-1>. [Online] 2018
- [8] Hodel, H. Vergleichsmessungen mit elektromagnetischen Geschwindigkeitssonden. 100 Jahre Eichstätte für hydrometrische Flügel. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern 1996
- [9] Němeček, P. Nejistoty měření. Praha: Česká společnost pro jakost, o. s., 2008

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## ABSTRAKT

Tato experimentální diplomová práce je zaměřená na posouzení směrové citlivosti a přesnosti měření bodové rychlosti proudu za pomoci elektromagnetických indukčních měřidel v poměrech simulujících podmínky reálných měrných profilů. Teoretická část práce popisuje problematiku stanovení průtoku kapalin v otevřených korytech a stanovení příslušných nejistot měření. Dále je popsána zkušební trať a předmětná posuzovaná měřidla bodové rychlosti. Vyhodnocení experimentálních prací se zaměřuje na vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti a směrovou citlivost elektromagnetických indukčních měřidel bodové rychlosti. Získané výsledky jsou porovnány s parametry udávanými výrobcí, měřením jiných autorů a s odpovídajícími metrologickými charakteristikami vodoměrných vrtulí, které jsou pro tyto účely v reálných měrných profilech s volnou hladinou běžně používány.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromagnetické indukční měřidlo, vodoměrná vrtule, proudění kapalin, stanovení průtoku, otevřená koryta, bodová rychlost, nejistota měření, hydraulický okruh, intenzita turbulence, směrová citlivost

## ABSTRACT

This master's thesis deals with the assesment of directional sensivity and accuracy of current stream velocity using electromagnetic induction meters in circumstances simulating the real measurement profiles condictiones. The theoretical part of the thesis describes the issue of streamflow measurement in open channels and determination of the relevant measurement uncertainties. It also includes description of the hydraulic circuit and the subject current velocity meters. The experimental part of the thesis focuses on the effect of turbulence on the value and accuracy of measured velocity and directional sensivity of electromagnetic induction meters of current velocity. The results are compared with parameters given by manufacturers, research by other authors and with the metrological characteristics of hydrometric propellers, which are commonly used for streamflow measurement in open channels.

## KEYWORDS

electromagnetic induction meter, hydrometric propeller, streamflow, determination of flow, open channel, current velocity, relevant uncertainties, hydraulic circuit, intensity of turbulence, directional sensivity

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Martin Vítů *Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření*. Brno, 2020. 70 s., 89 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 15. 1. 2021

---

Bc. Martin Vítů

autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Posouzení vybraných metrologických charakteristik měřidel bodové rychlosti vodního proudu využívající elektromagnetického principu měření* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 1. 2021

---

Bc. Martin Vítů

autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Michalu Žouželovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné připomínky. Poděkování patří i společnosti DHI a.s. a Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. za vypůjčení měřidel. Současně děkuji své partnerce a rodičům, kteří mi byli oporou během celého mého studia.

## Obsah

1	Úvod.....	10
2	Proudění kapalin.....	11
2.1	Rozdělení typu proudění.....	11
2.1.1	Laminární proudění.....	11
2.1.2	Proudění v přechodné oblasti.....	11
2.1.3	Turbulentní proudění.....	12
3	Stanovení průtoku v otevřených korytech.....	13
3.1	Princip stanovení průtoku při užití metody rychlostního pole.....	13
3.2	Měření bodových rychlostí.....	14
3.2.1	Vodoměrné vrtule.....	15
3.2.2	EMI-měřidla.....	16
3.3	Stanovení průměrné rychlosti na svislici.....	19
3.4	Stanovení průtočného množství.....	20
3.4.1	Grafické metody.....	20
3.4.2	Aritmetické metody.....	21
4	Nejistoty měření.....	23
4.1	Standardní nejistoty typu A.....	23
4.2	Standardní nejistoty typu B.....	24
4.3	Standardní kombinované nejistoty.....	26
4.4	Rozšířená nejistota.....	26
4.5	Nejistoty měření při stanovení průtoku s využitím metody rychlostního pole.....	26
4.5.1	Vliv doby měření v měrném bodě.....	28
4.5.2	Vliv pozice měřidla bodové rychlosti k natékajícímu proudu.....	30
5	smerová citlivost zkoumaná jinými autory.....	33
6	Cíl a motivace práce.....	36
7	Průběh experimentálních prací.....	37
7.1	Hydraulický okruh laboratoře.....	37
7.2	Posuzované typy EMI-měřidel.....	39
7.2.1	EMI-měřidlo Valeport-Cylindrical – 801.....	40
7.2.2	EMI-měřidlo Valeport-Flat – 801.....	40
7.2.3	EMI-měřidlo Marsh-McBirney FLO-MATE 2000.....	41
7.2.4	EMI-měřidlo OTT Hydromet MF Pro.....	42
7.3	Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti.....	43
7.3.1	Průběh experimentálních prací.....	43



7.3.2	Vyhodnocení vlivu turbulence .....	45
7.4	Směrová citlivost .....	52
7.4.1	Průběh měření .....	52
7.4.2	Vyhodnocení měření provedené v horizontální rovině .....	54
7.4.3	Vyhodnocení měření provedené ve vertikální rovině .....	60
8	Závěr.....	64
9	Použitá literatura .....	65
10	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	67
11	Seznam příloh .....	70

# 1 ÚVOD

Ve vodním hospodářství je stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou zásadní. Znalost rychlosti, resp. velikosti průtoku je důležitá pro navrhování všech vodohospodářských staveb. Mezi základní způsoby stanovení průtoku s volnou hladinou je měření bodové rychlosti proudu pro určení průtoku metodou rychlostního pole.

S rozvojem technologií napříč celým průmyslem dochází i v této oblasti k rozvoji. Jelikož jediným schváleným úředním měřidlem bodové rychlosti proudu jsou vodoměrné vrtule, je snahou tato měřidla zdokonalovat. Současně je vyvíjen i tlak na využití technologií založených na jiných principech měření. Měřidla mohou být například ultrazvuková či jiného principu, ale nejvýznamnější skupinou jsou elektromagnetická indukční měřidla – ta mají oproti vodoměrným vrtulím s rotačním prvkem velkou výhodu v mnoha oblastech využití. Jedná se především o měření prováděná v profilech kanalizačních tratí s velkým množstvím plovoucích nečistot, které se běžně zachytávají na propeleru vodoměrné vrtule a tím zamezují získání správného výsledku.

Elektromagnetická měřidla pro měření bodových rychlostí jsou čím dál více využívána, nemohou se však používat pro potřeby úředního měření, proto je snahou této práce přispět k získání více informací a umožnit tak využití těchto měřidel v předemné oblasti.

Diplomová práce byla tvořena současně s úkolem řešeným v rámci Programu rozvoje metrologie 2020 [15] a přímo navazuje na dlouhodobou práci kolektivu pracovníků Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně zabývajících se v oblasti elektromagnetických indukčních měřidel jejich dlouhodobým chováním z pohledu technických a metrologických charakteristik.

Práce bude rozdělena na dvě základní části. První z nich teoreticky přibližuje problematiku proudění kapalin, stanovení průtoku v otevřených korytech a stanovení příslušných nejistot měření.

Ve druhé části bude popsán experimentální výzkum chování elektromagnetických indukčních měřidel, který byl realizován v laboratořích Fakulty stavební, a který přímo navazuje na zpracovanou teoretickou část. V této části se dozvíme o zkoumaných metrologických charakteristikách, konkrétně o měření intenzity turbulence a její analýze v podmínkách reálného proudění v měrných tratích a také posouzení směrové citlivostní charakteristiky snímačů.

## 2 PROUDĚNÍ KAPALIN

V následující kapitole je uvedeno rozdělení typu proudění v otevřených korytech, tato problematika je základem této diplomové práce.

### 2.1 Rozdělení typu proudění

V otevřených kanálech se lze setkat s několika typy proudění. Pokud je hlavním kritériem čas, dělíme ho na ustálené a neustálené. Ustálené proudění se dále dělí na rovnoměrné proudění a nerovnoměrné proudění, kde u rovnoměrného proudění je rychlost a plocha průtočného průřezu konstantní a u nerovnoměrného jsou tyto veličiny funkcí polohy.

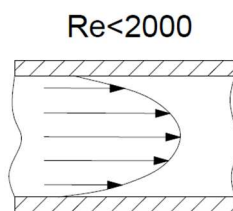
Jelikož se tato diplomová práce z části věnuje chování měřidel při turbulentním proudění, je důležité zmínit dělení proudění na laminární a turbulentní. Při tomto přístupu je charakter proudění závislý na třecích a setrvačných silách v kapalině, tento vztah je vyjádřen Reynoldsovým kritériem ( $Re$ ):

$$Re = \frac{vD}{\nu}, \quad (2.1)$$

kde  $v$  je rychlost [m/s],  $D$  je průměr trubice [m] a  $\nu$  je viskozita kapaliny [m<sup>2</sup>/s]. [1]

#### 2.1.1 Laminární proudění

U laminárního proudění se částice tekutiny pohybují po rovnoběžných drahách, proudnice se nekříží. Třecí síly potrubí způsobují, že rychlost je rozdělena parabolicky s nejmenší rychlostí na okraji a největší v ose potrubí. [1]

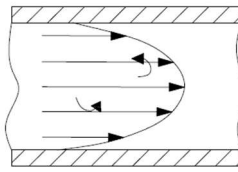


Obr. 2.1 Rychlostní profil laminárního proudění

#### 2.1.2 Proudění v přechodné oblasti

V přechodné oblasti se může nacházet laminární proudění, které se při jakémkoliv vnějším impulzu může změnit na turbulentní, z toho plyne, že se zde mohou vyskytovat obě proudění současně. [1]

$2000 < Re < 4000$



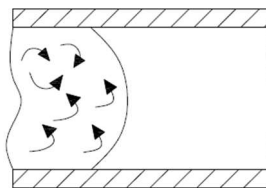
*Obr. 2.2 Rychlostní profil přechodné oblasti*

### **2.1.3 Turbulentní proudění**

U turbulentního proudění záleží na příčném výkyvu a mísení částic kapaliny. Jev zvětšuje tangenciální napětí a ztráty. V příčném průřezu jsou rychlosti vyrovnanější než u laminárního proudění. [1]

Při proudění v otevřených korytech se setkáváme prakticky pouze s tímto typem proudění a pro experimentální část práce je tento typ proudění charakteristický.

$4000 < Re$



*Obr. 2.3 Rychlostní profil turbulentního proudění*

### 3 STANOVENÍ PRŮTOKU V OTEVŘENÝCH KORYTECH

Ve vodním hospodářství je stanovení průtoku v profilech s volnou hladinou zásadní. Znalost rychlosti, resp. velikosti průtoku je důležitá pro navrhování všech vodohospodářských staveb, jako jsou například stavby protipovodňové ochrany, návrhy jezů, přehrad a rybníků, návrhy stok nebo v oblasti vypouštění vod z čistíren odpadních vod.

Úřední měření průtoku vody v přirozených korytech velkých vodních toků je prováděno primárně dle ČSN ISO 748 [2], související normy jsou dále například ISO 1088 [4] a ČSN 259312 [14]. U menších profilů, které se odlišují geometrickými i proudovými okrajovými podmínkami a je v nich prováděno tzv. úřední měření (viz poznámka níže), postupuje se dle metrologického předpisu MP 010 [3] za použití následujících metod – metoda rychlostního pole, objemová metoda (metoda jímání vody do odměrné nádoby), vážicí metoda (metoda jímání vody do vážicího vaku), přenosná měřicí sestava s průtokoměrem, měrné přelivy a žlaby.

Tato diplomová práce se zabývá především metodou rychlostního pole, proto následující kapitola přiblíží danou problematiku více do detailu.

**Poznámka:** Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů definuje úřední měření jako metrologický výkon, o jehož výsledku vydává autorizovaný subjekt doklad, který má charakter veřejné listiny. Tyto metrologické výkony jsou oprávněny provádět pouze subjekty, které Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví k úřednímu měření na základně jejich žádosti autorizoval. Podmínkou výkonu úředního měření je požívání měřidel, u kterých je zajištěna metrologická návaznost, vlastnictví certifikátu odborné způsobilosti úředního měřiče vydaný akreditovanou osobou nebo osvědčení o odborné způsobilosti vydané Úřadem a dohled prováděný Českým metrologickým institutem. [16]

#### 3.1 Princip stanovení průtoku při užití metody rychlostního pole

Stanovení průtoku pomocí klasické (bodové) metody rychlostního pole je založena na integraci funkce rychlostního pole, přes plochu průtočného průřezu  $S$  dle rovnice:

$$Q = \iint_S f(u_i) dx dy, \quad (3.1)$$

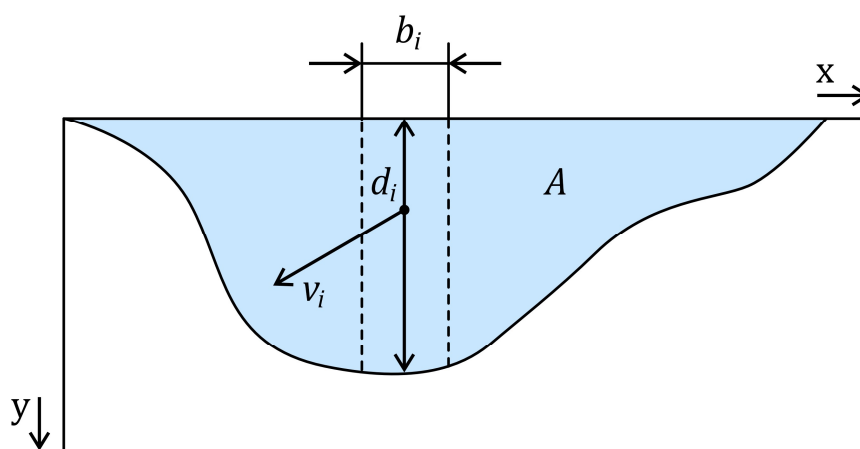
kde  $f(u_i)$  je funkce rychlostního pole. [3]

Funkce rychlostního pole  $f(u_i)$  není známa, proto je nutné ji stanovit a to tak, že ve vhodně zvolených bodech průtočného profilu jsou měřeny bodové rychlosti  $u_i$ , které jsou pak aproximovány vhodnou matematickou funkcí. [3]

Stanovení funkce bodové rychlosti a její následná integrace je nejdříve provedena po výšce měrného profilu (ve svislicovém či mezisvislicovém pásu). Dostaneme tak průměrnou rychlost  $\bar{v}_i$  na měrné svislici. Následně jsou tyto průměrné rychlosti na svislicích aproximovány a integrovány po šířce měrného profilu. Takto je dosaženo hodnoty proteklého množství  $Q$ . Dle ČSN EN ISO 748 [2] lze tento postup zapsat:

$$Q = \sum_{i=1}^m b_i \cdot h_i \cdot \bar{v}_i, \quad (3.2)$$

kde  $Q$  je celkový stanovený průtok,  $b_i$  je šířka svislicového či mezisvislicového pásu,  $h_i$  je hloubka svislicového či mezisvislicového pásu,  $\bar{v}_i$  je průměrná rychlost na měrné svislici a  $m$  je počet svislicových či mezisvislicových páسů. [2]



Obr. 3.1 Definiční schéma metody rychlostního pole

### 3.2 Měření bodových rychlostí

Pro měření bodových rychlostí se převážně používají vodoměrné vrtule, které jsou dle stávající legislativy jedinými měřidly rychlosti pro realizaci úředního měření. Alternativou mohou být i jiné měřicí hydrometrické přístroje, například indukční nebo ultrazvukové.

Elektromagnetické indukční hydrometrické přístroje (dále zkráceně pouze jako EMI-měřidla) jsou čím dál více používány pro měření bodové rychlosti, proto je snahou umožnit jejich využití i v případě úředního měření. Výzkum uváděný v této práci je právě posouzením vybraných metrologických charakteristik u elektromagnetických průtokoměrů s následným porovnáním s chováním vodoměrných vrtulí.

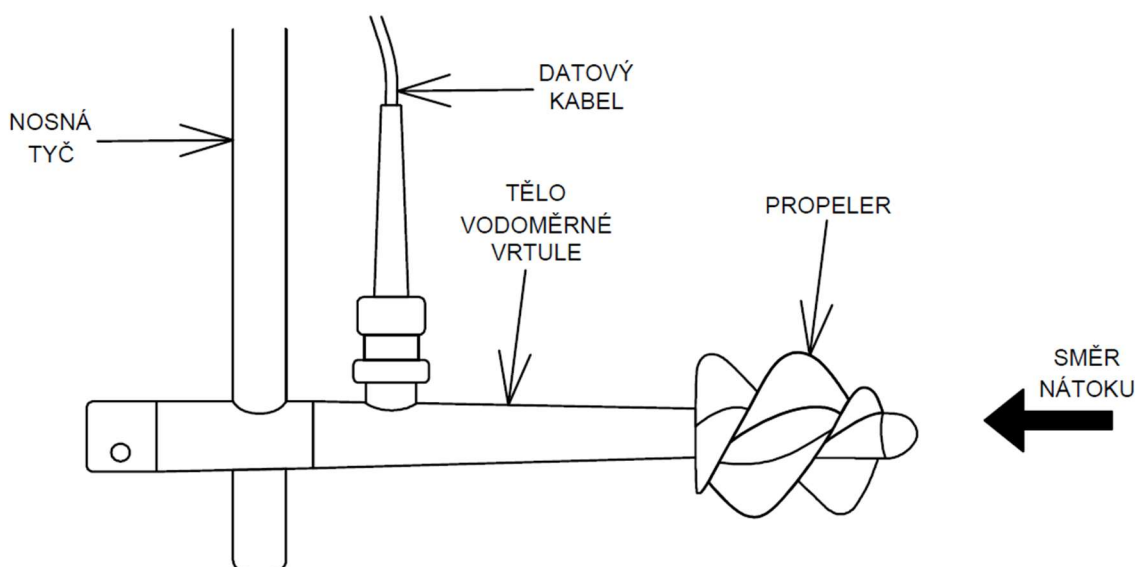
U obou typů měřidel je však nutné v případě úředního měření pro zajištění správnosti měření zajistit jejich metrologickou návaznost v kalibrační laboratoři.

### 3.2.1 Vodoměrné vrtule

I přes rychlý rozvoj moderní techniky je vodoměrná (hydrometrická) vrtule (obr. 3.2) stále nejpoužívanějším přístrojem pro měření rychlosti proudění vody a stanovení průtoku metodou rychlostního pole. Základní charakteristikou je vztah pro přepočet mezi otáčkami vrtule a rychlostí proudění, dle rovnice:

$$u = \alpha + \beta \cdot n, \quad (3.3)$$

kde  $u$  je bodová rychlost proudu,  $n$  je frekvence otáček a  $\alpha$ ,  $\beta$  jsou konstanty uvedené v kalibračním listu vodoměrné vrtule.



Obr. 3.2 Popis vodoměrné vrtule

Vodoměrné vrtule lze rozdělit na dva typy:

- vrtule miskovitého typu;
- vrtule propelerového typu.

Vrtule miskovitého typu jsou u nás méně obvyklé, na rozdíl od USA, kde jsou více rozšířené. Skládá se z vodorovného kola, složeného z (obvykle šesti) misek nebo zakřivených lopatek a ocasního kormidla na určení směru proudění měřené kapaliny. [11]

Vrtule propelerového typu se dále dělí na malé vrtule, velké vrtule a jiné typy. Skládají se z propeleru v podobě šroubovicové plochy nebo pravoúhlých lopatek upevněných ve stejných vzdálenostech po obvodu horizontální osy těla s kuličkovým ložiskem. Měřená bodová rychlost se vypočte ze vztahu 3.3. Velkou předností je univerzálnost vrtulí, kdy může být tělo vrtule kombinováno s různými propelery. Pro přehlednost jsou v tab. 3.1 uvedeny

detailnější informace o propelerech typu OTT C2, vyráběných v OTT HydroMet GmbH, Německo – Kempten. [11]

*Tab. 3.1 Přehled základních parametrů vrtulí propelerového typu*

Číslo vrtule	Průměr	Stoupání	Minimální rychlost	Maximální rychlost	Komponentní účinek
[-]	[mm]	[mm]	[m/s]	[m/s]	[± °]
1	50	50	0.025	1.0	30
3	50	250	0.035	4.0	10
5	30	50	0.050	1.0	20
6	30	100	0.055	2.0	10

### 3.2.2 EMI-měřidla

Elektromagnetická metoda jednorázového měření rychlosti v otevřených korytech není v České republice příliš rozšířena. Avšak čím dál více subjektů autorizovaných pro úřední měření průtoku používá k pomocnému měření právě EMI-měřidla. Jednou z výhod v získání bodové rychlosti pomocí těchto měřidel je ten, že není pro běžná měření potřeba vztah pro přepočítání a rychlost je známá ihned po měření.

EMI-měřidla lze rozdělit podle produktů nabízených výrobcem a uváděných v technických normách [7] na:

- měřidla využívající cívku, na plnou šířku kanálu;
- elektromagnetická indukční měřidla bodových rychlostí.

Měřidla využívající cívku na plnou šířku kanálu fungují tak, že elektromagnetickou indukci způsobenou protékáním vody vertikálním magnetickým polem se mezi oběma protějšími břehy vyvolávají malé elektrické potenciály. Magnetické pole je tvořeno cívku překlenutou napříč řekou nebo ukrytou pod dnem. Elektrické potenciály jsou funkcí magnetického pole, šířky řeky a průřezové rychlosti. Vynásobením průtočné plochy a průřezové rychlosti je následně získán průtok. [7]

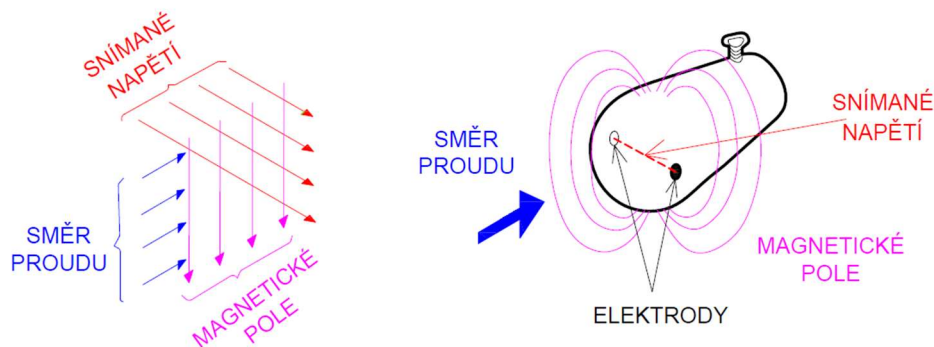
EMI-měřidla při měření rychlosti proudění kapaliny pracují na principu Faradayova zákona elektromagnetické indukce, který říká, že na koncích elektrického vodiče, pohybujícího se magnetickým polem, vzniká elektrické napětí. Velikost takto vzniklého napětí je přímo úměrná rychlosti pohybu elektrického vodiče napříč magnetickým polem. [8]

Aby mohlo výstupní napětí na elektrodách reprezentovat rychlost proudu v měřeném bodě (měrném objemu v okolí měřidla), musí kapalina proudit přímo proti čelu měřícího



snímače, a potom tedy budou i směr proudění, magnetické pole a polarita snímaného napětí navzájem kolmé, jak lze vidět na obrázku 3.3. [9]

Měřicí snímač se skládá z elektromagnetické cívky, která vytváří potřebné elektromagnetické pole a z dvojice (či více párů) uhlíkových elektrod, měřících napětí indukované rychlosti elektrického vodiče (proudící voda). Stanovené napětí je vyhodnocovací jednotkou zpracováno a převedeno na rychlost. [9]



Obr. 3.3 Princip měření rychlosti kapaliny měřicím snímačem

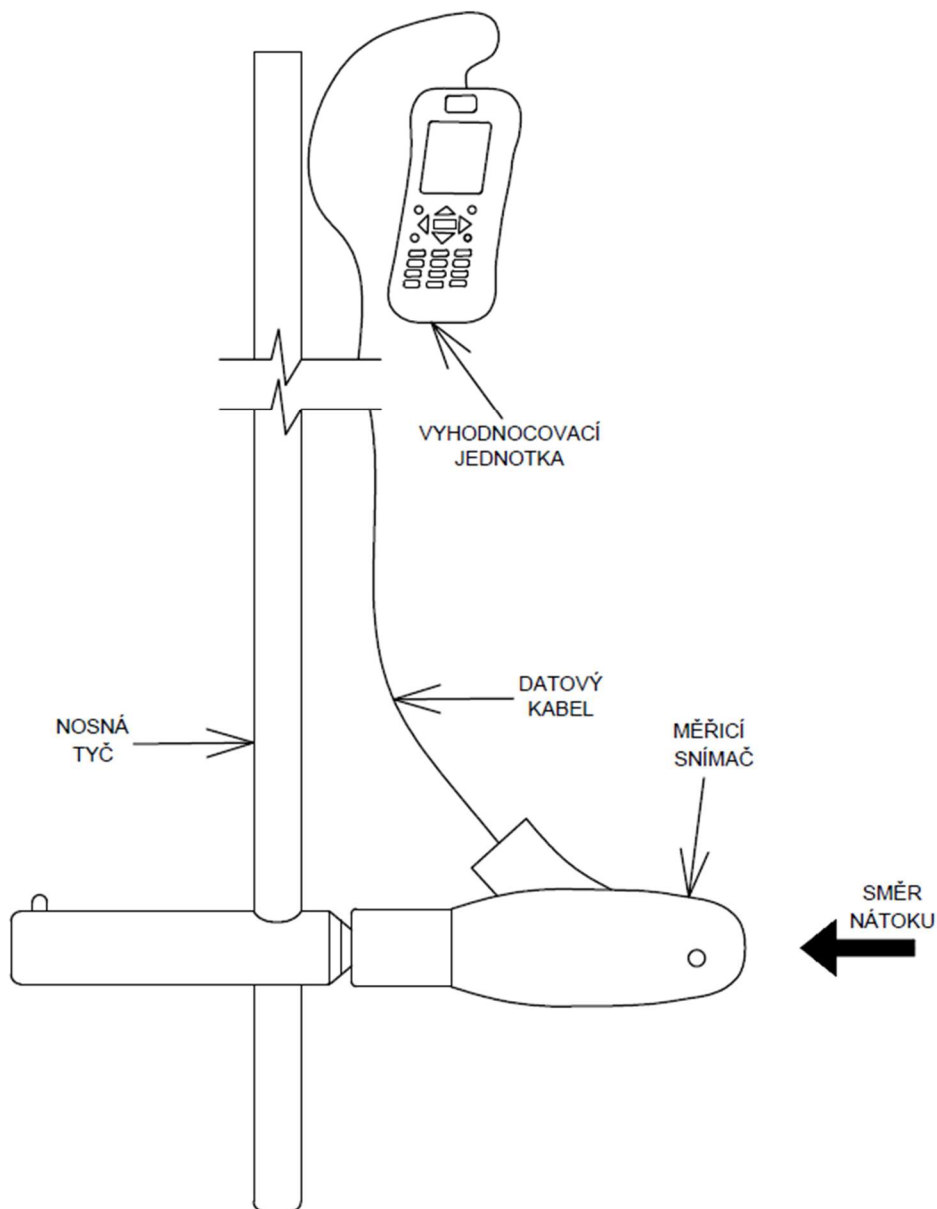
Většina EMI-měřidel je schopna definovat směr proudu, to znamená, že jsou schopna určit, zda je směr toku vpřed nebo vzad vzhledem k referenční rovině měřicího snímače. [10]

Pro správnou funkčnost měřidel je důležité, aby voda, ve které probíhá dané měření, byla vodivá. Pro pitnou vodu se udává měrná elektrická vodivost okolo (200 – 400)  $\mu\text{S/cm}$ , mechanicky předčištěné vody 2000  $\mu\text{S/cm}$  a například pro destilovanou vodu je to (0,5 – 3,0)  $\mu\text{S/cm}$ . Minimální požadovaná měrná vodivost vody se liší výrobcem měřidel nebo typem měřidla. Běžné indukční průtokoměry měří při hodnotě 5  $\mu\text{S/cm}$ , minimální udávanou hodnotou měřitelnosti je 0,1  $\mu\text{S/cm}$ . U EMI-měřidel je požadavek na minimální elektrickou vodivost kolem 20  $\mu\text{S/cm}$ . OTT HydroMet GmbH [9] udává pro svá zařízení počátek měřicí schopnosti okolo 50  $\mu\text{S/cm}$ . [8] [10]

EMI-měřidla lze použít v téměř každé situaci jako vodoměrné vrtule, výjimkou jsou místa, kde mohou vykazované veličiny ovlivnit silná vnější elektromagnetická pole nebo elektrické rušení. Tyto rušivé elementy se mohou objevit v blízkosti tratí tramvajové či vlakové dopravy, velkých točivých strojů nebo zařízení s měniči frekvence. Naopak velkou výhodou je, že EMI-měřidla neobsahují žádné pohyblivé konstrukční části. [10]

Většina EMI-měřidel má podobnou konstrukci, skládající se z následujících komponentů (viz obr. 3.4) [9]:

- měřicí snímač – je tvořen „aerodynamickým“ pevným tělem, jednoho či více párů snímacích elektrod a uchycovacím šroubem;
- nosná tyč – může být nahrazena kabelem, ocasní ploutví nebo olovněným závažím;
- vyhodnocovací jednotka – měla by být voděvzdorná a odolná vůči nepříznivým podmínkám;
- datový kabel – při změně délky kabelu, je nutné překalibrovat průtokoměr;
- zdroj elektrické energie – je obvykle akumulátor umístěný ve vyhodnocovací jednotce.



*Obr. 3.4 Popis EMI-měřidla*

### 3.3 Stanovení průměrné rychlosti na svislici

Měření a stanovení průměrné rychlosti na svislici se provede za využití redukovaných či vícebodových metod v souladu s ČSN EN ISO 748 [2].

Stanovení rychlosti lze obecně provést dvěma způsoby, a to početně nebo graficky. Početní metoda se doporučuje používat při orientačních výpočtech, pro vyhodnocení se primárně využívá grafická metoda.

Stanovení průměrné svislicové rychlosti a následné celkové rychlosti vychází z měření bodové rychlosti pomocí měřidel bodové rychlosti. Volba metody měření rychlosti závisí na určitých faktorech. Jedná se o dostupnost v čase, šířku a hloubku koryta, podmínky dna v měřicím profilu a úsek koryta proti proudu, použité vybavení, rychlost kolísání hladiny a očekávaný stupeň přesnosti. [2]

Dle ČSN EN ISO 748 [2] jsou metody stanovení průměrné rychlosti na svislici klasifikovány následovně:

- **Metoda rychlostního pole** – při použití této metody jsou hodnoty průměrné rychlosti získány měřením bodové rychlosti v několika bodech, v každé svislici mezi dnem koryta a hladinou vody, přičemž počet a rozmístění bodů by mělo být zvoleno tak, aby bylo vybíráno s ohledem na rozdělení rychlosti po výšce svislice. Všechny naměřené hodnoty bodové rychlosti se vynesou do diagramu a měrný průtok nebo průměrná rychlost se stanoví planimetrováním. S rozvojem výpočetní techniky v dnešní době dochází k trendu upřednostňovat jiné ekvivalentní metody, při nichž je průběh rychlostí ve svislici aproximován vhodnou matematickou funkcí, která je pak výchozím podkladem pro aproximaci průběhu rychlostí v celém měrném profilu, prostorovou matematickou funkcí. [2]
- **Redukované (zkrácené) bodové metody** – tyto metody jsou méně přesné než metody využívající celé rychlostní pole. V praxi se používají naopak tehdy, kdy není dostatek času, protože jsou méně časově náročné. Nicméně jejich zjednodušení vychází z předpokládaného tvaru rychlostního profilu. [2]
- **Integrační metoda** – tato metoda je založena na postupném spouštění a vytahování vodoměrné vrtule přes celou hloubku každé svislice rovnoměrnou rychlostí. Při použití vodoměrné vrtule propelerového typu se průměrná rychlost na svislici stanoví z průměrného počtu otáček, v závislosti na celkové době měření na svislici. U stanovení průměrné rychlosti na svislici pomocí měřidel s přímým měřením rychlosti (např. EMI-měřidla), můžeme hodnotu odečíst přímo z přístroje. [2]
- **Další metody** – Šestibodová metoda, Pětibodová metoda, Tříbodová metoda, Hladinová jednobodová metoda. [2]

### 3.4 Stanovení průtočného množství

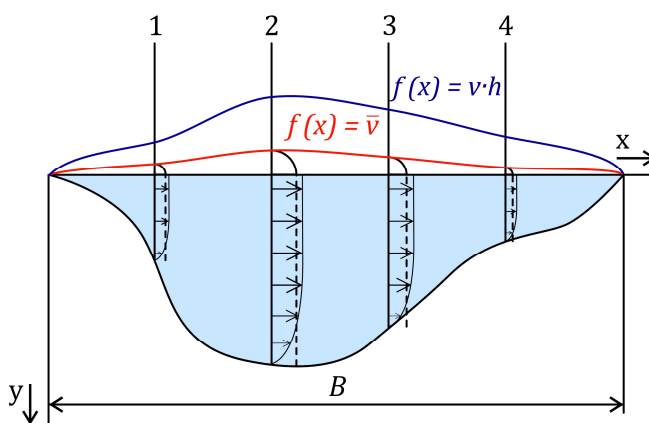
Je důležité si uvědomit, že na požadovanou přesnost výsledku nemají vliv pouze zvolené metody, ale i volba počtu měrných svislic, tvar a rozměr průtočného průřezu, míra deformace rychlostního pole v čase, počet měrných bodů na měrné svislici, zvolení správného typu měřidla bodových rychlostí a v neposlední řadě schopnosti a zodpovědnosti měřiče.

V předchozích kapitolách byly uvedeny metody pro stanovení průměrné rychlosti v jednotlivých svislicích. V následujících podkapitolách jsou uvedeny metody stanovení průtoku měřené vodoměrnými vrtulemi dle [2].

#### 3.4.1 Grafické metody

Do grafických metod patří metoda integrace hloubka-rychlost (metoda rozdělení rychlostí) a integrační metoda rychlostního pole (metoda rychlostního profilu).

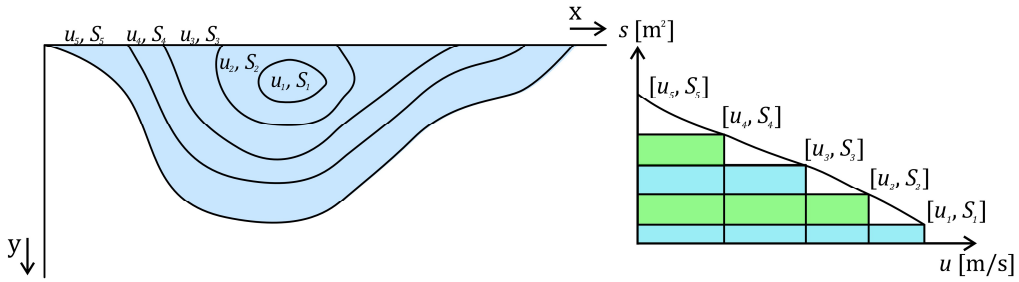
- **Integrace hloubka-rychlost** – je nejpoužívanější grafickou metodou a je znázorněna na obrázku 3.5. Průměrné rychlosti na svislici jsou vyneseny graficky proti hloubce, čímž vznikne čára viz Obr. 3.5. Plocha vytvořená pod touto čarou, přímkou znázorňující hladinu a šířkou měrného profilu, udává měrný průtok odpovídajícího pásu. Hodnoty měrného průtoku ( $\bar{v} \cdot h$ ) jsou vyneseny graficky do diagramu a spojeny do tvaru souvislé čáry. Interpolací získáme funkci  $f(x) = \bar{v} \cdot h$ . Stanovením plochy pod takto sestrojenou křivkou a úsečkou reprezentující vodní hladinu, získáme celkové průtočné množství. [2]



Obr. 3.5 Schéma metody Integrace hloubka-rychlost

- **Integrační metoda rychlostního pole** – je méně známá grafická metoda, při které se interpolací mezi naměřenými bodovými rychlostmi sestrojí izotachy (čáry spojující body měrného profilu se stejnou bodovou rychlostí), to lze vidět na obrázku 3.6. Plochy musí být uzavřeny jednotlivými izotachami, změřeny planimetrem a následně vyneseny

do dalšího grafu (obr 3.7). Plocha pod vzniklou křivkou představuje průtok v příčném profilu. [2]



Obr. 3.6 Rychlostní profil

Obr. 3.7 Stanovení průtoku

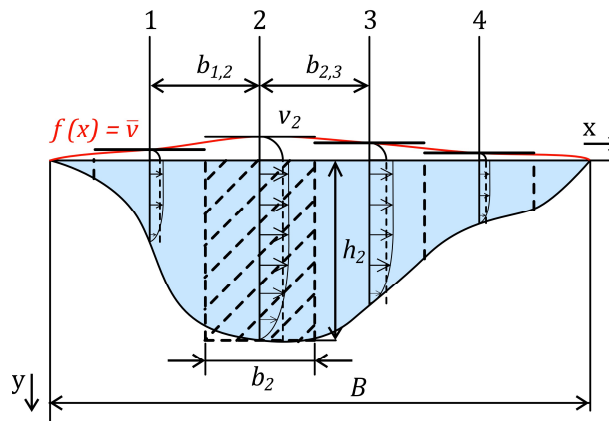
### 3.4.2 Aritmetické metody

Aritmetické (numerické) metody se používají převážně tehdy, kdy není z důvodu času možné využít grafické metody, další výhodou je jejich jednoduchost. Dělíme je na metodu svislicových pásů, metodu mezisvislicových pásů a ostatní numerické metody.

- **Metoda mezisvislicových pásů** – je založena na rozdělení příčného profilu do několika pásů, všechny jsou ohraničeny dvěma přilehlými svislicemi, jak lze vidět na obrázku 3.8. Měrný průtok každým mezisvislicovým pásem lze určit jako součin aritmetického průměru průměrných rychlostí na přilehlých svislicích, aritmetického průměru hloubek měřených v místech přilehlých svislic a šířky pásu. Celkový průtok měrným profilem se získá jako suma všech měrných průtoků mezisvislicových pásů, dle vztahu:

$$Q = \sum_{i=1}^{m-1} \left[ \left( \frac{\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1}}{2} \right) \left( \frac{h_i + h_{i+1}}{2} \right) b_{i,i+1} \right], \quad (3.4)$$

kde  $m$  je počet svislic,  $\bar{v}_i$  a  $\bar{v}_{i+1}$  jsou průměrné rychlosti,  $h_i$  a  $h_{i+1}$  jsou celkové hloubky a  $b_{i,i+1}$  je vodorovná šířka mezi svislicemi. [5]

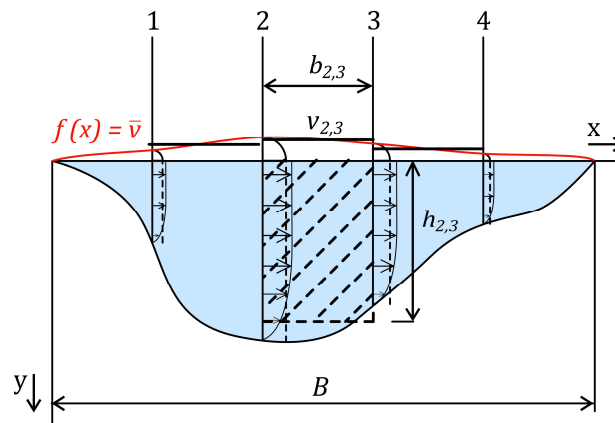


Obr.3.8 Schéma metody mezisvislicových pásů

- **Metoda svislicových pásů** – předpokládá s lineární změnou funkce  $f(x) = \bar{v} \cdot h$  po šířce měrného profilu viz obrázek 3.9. Průtok v každém pásu je vypočítán násobkem funkce  $f(x) = \bar{v} \cdot h$  odpovídající šířkou pásu změřenou v úrovni hladiny. Tato šířka se stanoví jako součet polovin vzdáleností od svislice, pro kterou byla funkce  $f(x)$  počítána a svislicím sousedícími na obou stranách tytéž svislice. Hodnota funkce  $f(x)$  ve dvou polovičních šířkách u břehů může být nulová, z těchto důvodů by při použití této metody měly být obě krajní svislice co nejbližší ke břehům. Výpočet průtočného množství je proveden v každé svislici zvlášť a celkový průtok profilem je získán jejich sumou, dle vztahu:

$$Q = \sum_{i=1}^m \left[ \bar{v}_i h_i \frac{b_{i-1,i} + b_{i,i+1}}{2} \right], \quad (3.5)$$

kde  $m$  je počet svislic,  $\bar{v}_i$  je průměrná rychlost,  $h_i$  je celková hloubka a  $b_{i,i+1}$ ,  $b_{i-1,i}$  jsou vodorovné šířky mezi svislicemi. [5]



Obr. 3.9 Schéma metody svislicových pásů

- **Ostatní numerické metody** – jsou v porovnání s oběma dříve uvedenými metodami složitější. Taktéž se snaží o aproximaci řešení metody integrace hloubka-rychlost s využitím integrovatelných matematických funkcí, např. lineární interpolační splajn, interpolační polynom  $n$ -tého stupně, interpolační kubický splajn nebo Hermitův interpolační kubický splajn. [5]

## 4 NEJISTOTY MĚŘENÍ

Pro definování přesnosti provedeného měření určité veličiny je v metrologii zaveden pojem „nejistota měření“, která je i s příklady podrobněji popsána v následující kapitole. [5] [6]

Nejistota měření odpovídá intervalu (rozptylu) konstruovanému v okolí výsledku měření, ve kterém se s určitou pravděpodobností předpokládá výskyt (obvykle 95 %) skutečné hodnoty měřené veličiny. Pokud se jedná o nejistotu, pak výsledkem měření není jeden bod (jedna hodnota), ale interval (oblast, ve které se s určitou pravděpodobností nachází výsledek měření). [5] [6]

Stanovením přesné hodnoty měřené veličiny by znamenalo získat nekonečné množství informací. Jevy, které způsobují nejistotu, jsou zdroje nejistoty, jako například nereprezentativní výběr vzorků, nedostatečná znalost vlivu okolí, lidský faktor, nepřesné hodnoty konstant apod. [5] [6]

Základní charakteristikou nejistoty je standardní nejistota, kterou dále v textu budeme značit písmenem  $u$  a je možné ji vyjádřit dvěma způsoby a to [6]:

- absolutní standardní nejistota – je vyjádřena v jednotkách měřené veličiny;
- relativní standardní nejistota – je vyjádřena poměrem absolutní nejistoty a hodnoty příslušné veličiny, obvykle je tato hodnota vyjádřena v procentech vynásobením stem.

Standardní nejistoty se dělí podle způsobu získání (vyhodnocení) na [6]:

- standardní nejistoty stanovené postupem A (nejistoty typu A);
- standardní nejistoty stanovené postupem B (nejistoty typu B).

Dalšími úpravami a sloučením těchto dvou základních typů nejistot získáme [6]:

- kombinovanou standardní nejistotu;
- rozšířenou nejistotu.

### 4.1 Standardní nejistoty typu A

Standardní nejistota typu A ( $u_A$ ) se stanoví pomocí statické analýzy naměřených údajů. Jedná se o zpracování  $n$ -krát opakovaného měření, obecně  $i$ -tého parametru  $X_i$ , při stejně přesných měřeních, stejných podmínkách a vzájemně nezávislých měřeních  $x_{i1}, x_{i2} \dots x_{in}$ . Potom lze odhad hodnoty měřeného parametru  $X_i$  stanovit vztahem:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (4.1)$$

a směrodatnou odchylkou aritmetického průměru parametru  $X_i$  vztahem:

$$u_{ax} = s_{\bar{x}i} = \frac{s_{xi}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}, \quad (4.2)$$

kde  $s_{xi}$  je směrodatná odchylka parametru  $X_i$ ;

$n$  je počet měření  $i$ -tého parametru  $X_i$ ;

$j$  je  $j$ -tá hodnota měření parametru  $X_i$ ;

$x_{i1}, x_{i2} \dots x_{in}$  jsou hodnoty jednotlivých měření;

$n$  je počet měření. [6]

Pokud je počet měření  $n$  parametru  $x_i$  menší než 10 a není možné učinit kvalifikovaný odhad na základě měření, které bylo provedeno v přibližně stejných podmínkách s větším počtem opakování, lze standardní nejistotu typu A stanovit přibližně vztahem:

$$u_{Ax} = k_x S_x, \quad (4.3)$$

kde  $k_x$  je koeficient závislý na počtu opakování (např.  $n = 4 \rightarrow k_x = 1,7$ ,  $n = 3 \rightarrow k_x = 2,5$ .) [5]

Hodnota  $k_x$  se se snižujícím počtem opakování zvětšuje, proto se doporučuje používat 10 a více opakování. [6]

Bude-li funkce  $Y$  funkcí  $m$  nezávislých parametrů (jednotlivých zdrojů)  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , promítně se přes funkční závislost:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (4.4)$$

potom standardní nejistota  $u_{AY}$  typu A funkce  $Y$  se určí z Gaussova zákona šíření chyb

$$u_{AY} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} s_{\bar{x}1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} s_{\bar{x}2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} s_{\bar{x}i}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} s_{\bar{x}m}\right)^2}, \quad (4.5)$$

kde  $s_{\bar{x}i}$  je směrodatná odchylka výběrového průměru parametru  $X_i$  a  $\frac{\partial Y}{\partial X_i}$  je parciální derivace funkce  $Y$  podle parametru  $X_i$  (tzv. koeficient citlivosti). [6]

## 4.2 Standardní nejistoty typu B

Na rozdíl od nejistoty typu A se nejistota typu B ( $u_B$ ) nestanovuje statickým zpracováním opakovaného měření, ale zdroje nejistoty měření jsou známé a odhadnutelné příčiny. Tyto příčiny jsou nedokonalosti způsobené použitými měřicími přístroji a měřicí technikou,



použitými konstantami, použitými měřicími metodami, podmínkami, za kterých měření probíhá, nedostatečnými znalostmi nebo nedostatečnými praktickými zkušenostmi. [5] [6]

Při stanovení nejistoty typu B ze zdroje  $X_i$  odhadneme maximální rozsah odchylky  $\pm \Delta x_{max}$  od hodnoty veličiny, patřící zdroji. Dále se vybere rozdělení pravděpodobnosti (rozdělovací funkci), které nejlépe vystihuje výskyt hodnot  $\Delta x$  v maximálním intervalu. Mezi nejčastěji využívané rozdělovací funkce řadíme tyto: Normální – Gaussova, Trojúhelníková – Simpsonova, lichoběžníková, rovnoměrná – pravoúhlá, bimodální (trojúhelníková), bimodální (Diracova), dle této funkce stanovíme hodnotu  $\varepsilon$ . Nejčastější používanou variantou z důvodu jednoduchosti je rovnoměrné rozdělení, ale bohužel přináší největší nejistotu. Nejistota typu B jednotlivých zdrojů se pak stanoví ze vztahu [6]:

$$s_{xi} = \frac{\Delta X_{max}}{\varepsilon}. \quad (4.6)$$

Bude-li funkce  $Y$ , stejně jako u nejistoty typu A, funkcí  $m$  nezávislých parametrů (jednotlivých zdrojů)  $X_1, X_2, \dots, X_m$ , promítně se přes funkční závislost:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (4.7)$$

do nejistoty hodnoty měřené veličiny  $Y$  a tvoří její složky  $u_{Y,X_i}$ , která se vyjádří ze vztahu:

$$u_{Y,X_i} = A_{Y,X_i} s_{X_i}, \quad (4.8)$$

kde  $s_{X_i}$  je standardní nejistota parametru  $X_i$  a  $A_{Y,X_i}$  koeficient citlivosti, který lze popsat jako parciální derivace funkce  $Y$  podle parametru  $X_i$  vzorcem:

$$A_{Y,X_i} = \frac{\partial Y}{\partial X_i}. \quad (4.9)$$

Jelikož při přímém měření jedné veličiny lze předpokládat, že korelace mezi jednotlivými zdroji nejistoty jsou zanedbatelné, můžeme výslednou nejistotu typu B určit podle Gaussova zákona šíření chyb [6]:

$$u_{BY} = \sqrt{\sum_{i=1}^m A_{Y,X_i}^2 s_{X_i}^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial X_1} s_{X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_2} s_{X_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial X_m} s_{X_m}\right)^2}. \quad (4.10)$$

### 4.3 Standardní kombinované nejistoty

Standardní kombinovaná nejistota funkce  $Y$  ( $u_Y$ ) vznikne sloučením standardních nejistot typu A a standardní nejistoty typu B. Sloučit je lze pouze tehdy, jsou-li na stejné hladině spolehlivosti a musí být v souladu s předpokladem Gaussova zákona šíření chyb [6]:

$$u_Y = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (4.11)$$

### 4.4 Rozšířená nejistota

V praxi je snaha o snížení rizik (zvýšení pravděpodobnosti) zvětšením intervalu, proto se zavádí rozšířená standardní nejistota ( $U_Y$ ):

$$U_Y = k_U u_Y, \quad (4.12)$$

kde  $k_U$  je koeficient rozšíření (pokrytí) a  $u_Y$  je standardní kombinovaná nejistota.

Koeficient rozšíření lze stanovit konvencí nebo výpočtem, který není tak častý. Nejběžnější způsob stanovení koeficientu  $k_U$ , je na základě hladiny spolehlivosti 95 % pro normální (Gaussovo) rozdělení. Při této hladině spolehlivosti koeficient nabývá hodnoty  $k_U = 2$  ( $k_U = 1 \rightarrow 68\%$ ,  $k_U = 2,58 \rightarrow 99\%$ ) [6]

Jestliže se označí hodnota  $Y$  jako skutečnou a pravdivou, výsledek měření jako  $y$  a rozšířená kombinovaná nejistota jako  $U_Y$ , můžeme pak výsledek měření zapsat jako  $Y = y \pm U_Y$ . Zápis znamená, že skutečná hodnota  $Y$  od stanovené hodnoty  $y$ , nepřesáhne hranice intervalu  $\langle y - U_Y; y + U_Y \rangle$ . [6]

V praxi se používají dvě vyjádření, a to absolutní ( $Y = y \pm U_Y$ ) a relativní ( $\pm p_Y$ ) v procentech stanovené vzorcem:

$$p_Y = \frac{U_Y}{y} \cdot 100\%. \quad (4.13)$$

### 4.5 Nejistoty měření při stanovení průtoku s využitím metody rychlostního pole

Předchozí podkapitoly byly věnovány všeobecné problematice nejistot měření, tato podkapitola je upřesněním zdrojů nejistot, které se podílí na celkové nejistotě ve stanovení průtoku, využitím metody rychlostního pole.

Celková hodnota výsledné nejistoty při stanovení průtočného množství je tvořena kombinací dílčích nejistot. Mezi nejdůležitější nejistoty se řadí především:

- nejistota typu A a B při měření šířky pásu ( $p_{bi}$ );

- nejistota typu A a B při měření hloubky pásu ( $p_{hi}$ );
- nejistota typu A a B ve stanovení kalibračních konstant vodoměrné vrtule ( $p_{ci}$ );
- nejistota typu A ve stanovení průměrné rychlosti na měrné svislici ( $p_{vi}$ );
- nejistota typu B ve stanovení průtoku (průřezové rychlosti) v měrném profilu.

Každá z těchto uvedených nejistot je zároveň kombinací jiných vzájemně neodělitelných zdrojů nejistot. [5]

**Relativní nejistota typu A** ve stanovení průtoku  $p_{AQ}$  s využitím metody rychlostního pole se určí podle ČSNE EN ISO 748 [2] výrazem:

$$P_{AQ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left[ (b_i h_i \bar{v}_i)^2 \left( P_{Abi}^2 + P_{Ahi}^2 + P_{A\bar{v}i}^2 + \left(\frac{1}{n}\right) (P_{Aci}^2 + P_{Aui}^2) \right) \right]}{(\sum_{i=1}^m b_i h_i \bar{v}_i)^2}}, \quad (4.14)$$

kde  $m$  je počet svislic;

$n$  je počet bodů na svislici;

$p_{Abi}$  je nejistota při měření šířky pásu (stanovuje se staticky nebo se hodnoty převezmou z jiného měření, které proběhlo za podobných podmínek);

$p_{Ahi}$  je nejistota při měření hloubky pásu (stanovuje se analogicky k měření šířky pásu  $p_{Abi}$ );

$p_{Aui}$  je nejistota při měření bodové rychlosti proudu (tou se budeme podrobněji zabývat v této práci);

$p_{Aci}$  je nejistota ve stanovení kalibračních konstant vodoměrné vrtule (je stanovena mírou shody kalibrační křivky s průběhem měřených bodových rychlostí závislých na frekvenci otáčení vrtule);

$p_{A\bar{v}i}$  je nejistota ve stanovení průměrné rychlosti na svislici (závisí především na způsobu výpočtu průměrné rychlosti, na počtu měrných bodů na svislici a na způsobu aproximace rozdělení rychlostí po svislici od prvního bodu k hladině a posledního bodu ke dnu koryta).

**Relativní nejistota typu B** ve stanovení průtoku  $p_{BQ}$  s využitím metody rychlostního pole se určí podle ČSN EN ISO 748 [2] dle vztahu:

$$p_{BQ} = \sqrt{p_{Bb}^2 + p_{Bh}^2 + p_{Bc}^2 + p_{Bm}^2}, \quad (4.15)$$

kde  $p_{Bb}$ ,  $p_{Bh}$  nejistota pocházející z použitých délkových měřidel hloubek  $h$  a šířek  $b$  (hodnoty se získávají z kalibračních a ověřovacích listů příslušných měřidel);

$p_{Bc}$  je nejistota ve stanovení kalibračních konstant (tato nejistota vzniká ze způsobu provedení kalibrace);

$p_{Bm}$  je nejistota ve stanovení průřezové rychlosti v měrném profilu (je závislá na metodě aproximace a integrace rychlostního pole přes šířku měrného pole, a především na počtu svislic v měrném profilu).

Pomocí sloučení relativní nejistoty typu A a typu B obdržíme hodnotu **relativní standardní kombinované nejistoty** [2]:

$$p_Q = \sqrt{p_{AQ}^2 + p_{BQ}^2}, \quad (4.16)$$

dále lze dopočítat hodnotu **rozšířené nejistoty** pomocí vztahu [2]:

$$P_Q = k \cdot p_Q. \quad (4.17)$$

Jak bylo již zmíněno, práce se v následujících kapitolách bude zabývat převážně relativní nejistotou typu A při měření bodové rychlosti proudu, označenou jako  $p_{Au}$ , již velikost je dle [2] závislá na těchto faktorech:

- typ měřidla bodové rychlosti;
- absolutní hodnota měřené rychlosti;
- intenzita turbulence proudu;
- doba měření bodové rychlosti v měrném bodě;
- pozice měřidla vzhledem k natékajícímu proudu.

První tři uvedené faktory mají přímý vliv na dobu měření bodové rychlosti v měrném bodě. Jinak řečeno, volba doby měření by měla být závislá na typu měřidla bodových rychlostí, na absolutní hodnotě měřené rychlosti a na intenzitě turbulence proudu.

#### 4.5.1 Vliv doby měření v měrném bodě

Navzdory předpokladu podmínky ustáleného proudění, je okamžitá bodová rychlost v důsledku turbulence proudu náhodným jevem. Průměrná bodová rychlost, určená z měření v určitém bodě v konečném čase, bude v tomto bodě přiblížením ke skutečné časově střední bodové rychlosti. Hodnota nejistoty obecně s rostoucí dobou měření klesá. [5]

Pro vodoměrné vrtule se dle ČSN ISO EN 748 [2] doporučuje měření provádět po dobu minimálně 30 s. V metrologickém předpisu MP 010 [3] se pracuje v těchto případech s intervalem od 15 s do 60 s. V praxi se nejčastěji měření provádí po dobu 30 s.

V případě EMI-měřidla je dle ČSN ISO EN 748 [2] doporučena minimální doba měření 10 s. V novější verzi z roku 2008 již tato hodnota (10 s) uvedena není. Z rozboru dostupných zdrojů se však ukazuje, že se doporučované časy integrace pohybují od 5 s do 50 s.

Ze zkušeností a starších měření s EMI-měřidly bude doporučená délka integrace (doba měření v měrném bodě) velmi podobná jako u vodoměrných vrtulí někde mezi 10 s a 30 s.

Při studiu doporučených hodnot procentuálních nejistot v měření bodové rychlosti za použití vodoměrných vrtulí dle přílohy E normy ČSN ISO EN 748 [2] nás mohou překvapit jejich vysoké hodnoty. Ty však pokrývají širokou škálu proudových podmínek a typů měřidel používaných k měření. Proto by každý uživatel měřidla měl zvážit a v lepším případě (má-li tuto možnost) korigovat hodnoty nejistoty pro své vlastní podmínky měření. Tato korekce má být při zpracování a volbě času provedena ve smyslu norem [2] a [14]. Zvýšení času dle potřebné hodnoty ve stanovení bodové rychlosti se pak provede na základě měření turbulence v měrném bodě a z ní spočtené autokorelační funkce. Směrodatná odchylka  $s_u$  a autokorelační funkce  $\rho(k)$  jsou nejdůležitějšími parametry náhodného procesu fluktuace bodové rychlosti. [5]

Jak je uvedeno ve [2] jsou fluktuace rychlostí vzájemně závislé, to znamená, že rychlost v čase  $t_2$  je ovlivněna rychlostí v čase  $t_1$ . Tento společný vliv klesá s rostoucím intervalem  $t_2-t_1$ . Směrodatná odchylka se pak pro svou závislost na flukтуаční chybě vlivem vrůstající doby měření zmenšuje mnohem pomaleji, než by tomu bylo v případě vzájemné nezávislosti fluktuace rychlostí. Jestliže autokorelační funkce  $\rho(k)$  s časovým krokem  $k$  a směrodatná odchylka  $s_{u,t_0}$  jsou známy pro dobu měření  $t_0$ , směrodatnou odchylku bodové rychlosti pro dobu měření  $q \cdot t_0$ , kde  $q$  je vždy celé kladné číslo, lze určit ze vztahu:

$$s_{u,q \cdot t_0}^2 = \frac{s_{u,t_0}^2}{q} \left( 1 + 2 \sum_{k=1}^q \left( \left( 1 - \frac{k}{q} \right) \rho(k) \right) \right), \quad (4.18)$$

Z dříve uvedeného je patrné, že při praktických měřeních in situ není možné zabývat se rozborem fluktuací bodové rychlosti proudu, natož určovat hodnotu autokorelační funkce  $\rho(k)$ . Tento postup lze (v laboratorních podmínkách) s úspěchem využít pro korekci hodnot nejistoty při měření bodové rychlosti proudu  $p_{Au}$ , která je praktickým zhodnocením míry směrodatné odchylky  $s_{u,t_0}$ . Proto platí ve smyslu kapitoly 4 a vztahu (4.2), že:

$$\begin{aligned} p_{Au} &= 2 \cdot \frac{1}{u} \cdot s_{u,q \cdot t_0} = \\ &= 2 \cdot \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \frac{1}{\bar{u}} \cdot \frac{1}{\sqrt{q}} \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2 \cdot \left( 1 + 2 \sum_{k=1}^q \left( \left( 1 - \frac{k}{q} \right) \rho(k) \right) \right)} = \frac{1}{\sqrt{n}} p'_{Au}, \end{aligned} \quad (4.19)$$

kde:

$$\rho(k) = \frac{N}{N-k} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (u_i - \bar{u})(u_{i+k} - \bar{u})}{\sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})^2}, \quad (4.20)$$

je autokorelační funkce určující vliv vzájemné závislosti fluktuace měřených bodových rychlostí s časovým krokem  $k$ ;

$\bar{u}$  je časově střední hodnotou bodové rychlosti proudu;

$t_0$  je integrační dobou měření;

$n$  počtem měření in situ;

$N$  je počtem měřených hodnot bodových rychlostí v laboratorních podmínkách;

$p'_{Au}$  je nejistotou typu A ve stanovení bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95 % určenou za podobných podmínek v laboratoři;

$p_{Au}$  je nejistotou typu A ve stanovení bodové rychlosti proudu na hladině spolehlivosti 95 % in situ [5]

Výše uvedené „podobné“ měření je vhodné provést v laboratorních (předem definovaných) proudových podmínkách, které odpovídají proudovým podmínkám v reálných otevřených korytech. Podmínky lze popsat například intenzitou turbulence bodové rychlosti (především její podélné složky) stanovenou například z měření vodoměrnou vrtulí, která se vypočte ze vztahu:

$$T_u = \frac{s_{u,t_0}}{\bar{u}} = \frac{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i}, \quad (4.21)$$

kde  $u$  je hodnota bodové rychlosti proudu a  $n$  je počet hodnot časové řady měření. Velikost intenzity turbulence závisí i na způsobu jejího měření a použitém zařízení (vodoměrné vrtule, EMI-měřidla, ...). Nejčastějším způsobem vyjádření hodnoty stanovené vztahem (4.21) je v procentech (vynásobením stem). [5]

Obecně platí, že nejistota typu A ve stanovení bodové rychlosti proudu  $p_{Au}$  klesá s rostoucí hodnotou měřené rychlosti, s prodlužující se dobou měření a s klesající intenzitou turbulence.

#### 4.5.2 Vliv pozice měřidla bodové rychlosti k natékajícímu proudu

Jak bylo psáno dříve pozice měřidla bodové rychlosti vzhledem k natékajícímu proudu má vliv na hodnotu měřené rychlosti, resp. nejistoty v jejím stanovení. Správné umístění snímače měřidla do měrného bodu je důležité pro eliminaci faktoru ovlivňující nejistotu. Tělo snímače by mělo směřovat kolmo na rovinu měrného profilu, obzvlášť v případech praktického měření, kdy je často v důsledku zakalení vizuální kontrola polohy měřidla znemožněna. [5]

Pokud stanovíme, že úhel  $\alpha$  je odklon snímače měřidla od převládajícího směru natékajícího proudu,  $u_\alpha$  je rychlost vykazovaná měřidlem při úhlu  $\alpha$  a  $u_0$  je rychlost vykazovaná měřidlem při  $\alpha = 0^\circ$ , můžeme potom definovat relativní odchylky vztahy [5]:

$$\varepsilon = \frac{u_\alpha - u_0}{u_0}, \text{ resp.} \quad (4.22)$$

$$\omega = \frac{u_\alpha - u_0 \cdot \cos\alpha}{u_0 \cdot \cos\alpha}. \quad (4.23)$$

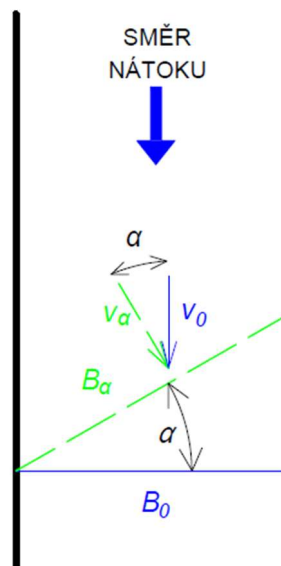
V návaznosti na průběh hodnot relativních odchylky  $\varepsilon$ , respektive  $\omega$ , dle vztahů (4.22) a (4.23), rozlišujeme měřidla na [5]:

- komponentní a
- nekomponentní.

Komponentní měřidlo při natočení své podélné osy od natékajícího proudu o úhel  $\alpha$ , zaznamená s dostatečnou přesností složku (komponentu) bodové rychlosti  $u_\alpha$ , jejíž hodnota je dána vztahem:

$$u_\alpha = u_0 \cdot \cos\alpha, \quad (4.24)$$

kde  $u_0$  je hodnota bodové rychlosti ve směru natékajícího proudu. Zároveň platí, že  $\varepsilon(\alpha) \approx \cos\alpha - 1$ , resp.  $\omega(\alpha) \approx 0$ . [5]



Obr. 4.1 Příklad využití měřidel s komponentními vlastnostmi

Této vlastnosti komponentních měřidel lze s výhodou využít v některých případech měření, například při nabízející se možnosti měření průtoku (průřezových rychlostí –  $v$ ) v měrném profilu odkloněném od směru proudění o úhel  $\alpha$ , kdy ve smyslu obr. 4.1 platí následující vztah:

$$B_0 \cdot v_0 = B_\alpha \cdot v_\alpha. \quad (4.25)$$

Nekomponentní měřidla se nechovají ve smyslu vztahu (4.25) a tudíž nevykazují vlastnosti komponentních měřidel. [5]

Musíme však dodat, že výše uvedené vztahy jsou platné pouze pro dostatečně dlouhé osově přímé prizmatické úseky.

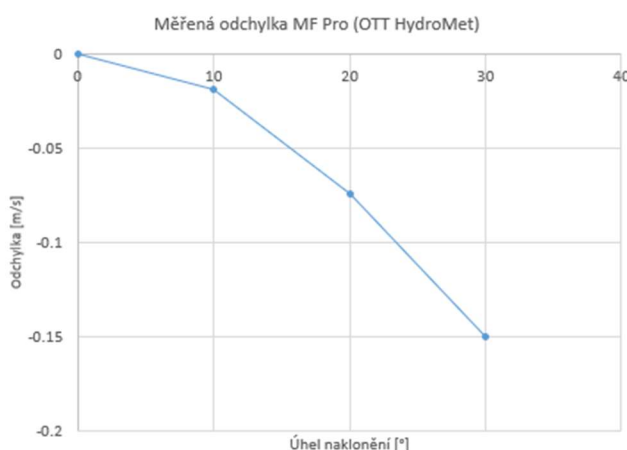


## 5 SMEROVÁ CITLIVOST ZKOUMANÁ JINÝMI AUTORY

K posouzení směrové citlivosti v experimentální části práce jsme použili čtyři typy EMI-měřidel, které budou blíže specifikovány v kapitole 7. Tato měřidla byla porovnávána s vodoměrnou vrtulí č. 1 (tab. 3.1) a pokud to bylo možné, tak i s výsledky z měření EMI-měřidly získanými z jiných zdrojů, ty budou přiblíženy v následující kapitole.

Měření směrové citlivosti probíhalo ve dvou rovinách, vertikální a horizontální. Směrová citlivost vybraných typů vodoměrných vrtulí byla posuzována v roce 2002 až 2006 na stejném žlabu jako naše měření, kompletní výsledky jsou v [5] a [12].

Firma OTT HydroMet pro své měřidlo MF Pro uvádí výsledky měření směrové citlivosti při rychlosti 0,61 m/s v publikaci [9]. Ve svém kalibračním kanále provedli zkoušky směrové citlivosti měřidla s natočením  $10^\circ$  v horizontálním směru (graf. 5.1). V tomto podkladu je uvedeno, že lze v úhlu pod  $10^\circ$  počítat s chybou menší než 1 %, s tím, že vykazovaná hodnota rychlosti je na úhlu odklonu v těchto rozsazích relativně necitlivá. Nad  $10^\circ$  odpovídá snižování vykazované rychlosti měřidlem v závislosti na úhlu natočení smyslu rovnice (4.24).



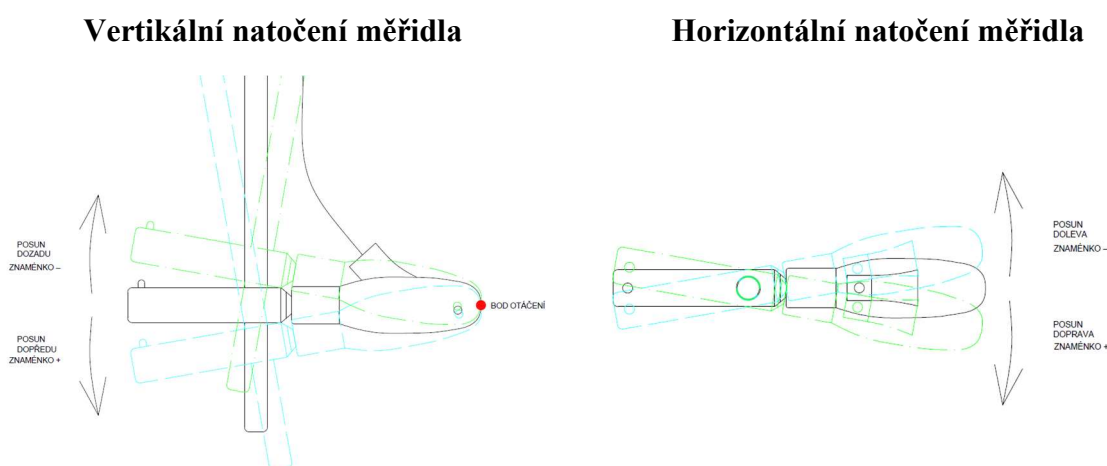
Graf 5.1 Závislost odchyly vykazované rychlosti na natočení snímače EMI měřidel MF Pro při rychlosti 0,61 m/s dle [9]

Hodel v roce 1996 podrobil experimentální zkouškou EMI měřidlo Flo-Mate 2000 v celém rozsahu rychlostí a výsledky byly publikovány v [13]. V této zkoušce posuzoval měřidlo jak v horizontálním, tak ve vertikálním směru, proto tyto výsledky budou s našimi později porovnány.

Tab. 5.1 Směrová charakteristika měřená v horizontální rovině pro Flo-Mate 2000 vyjádřena relativními odchylkami dle [13]

FLO-MATE, Nr 2'002'180				
Rozdíl rychlosti vozíku a rychlosti měřené pomocí Flo-Mate				
Úhel [°]	10 (vpravo)	20 (vpravo)	-10 (vlevo)	-20 (vlevo)
Rychlost	Odchylka	Odchylka	Odchylka	Odchylka
$u_{\alpha}$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$
[m/s]	[%]	[%]	[%]	[%]
0.01	15	-140	-14	-36
0.02	-12.5	-160	-10	-28
0.03	-16.3	-28.3	-5	-65.3
0.04	-16.5	-24.3	-6.5	-62.5
0.05	-13.2	-19.4	1.8	-42.8
0.1	-12.5	-13.2	-2	-33.6
0.2	-10.5	-14.1	-25.6	-22.6
0.5	-8.5	-15.1	-7.2	-16.6
1	-7.8	-16.9	-7.8	-16.4
1.5	-7.5	-14.4	-5.2	-14.8
2	-7	-16	-5.3	-13.9
2.5	-3.6	-13	-2.8	-11.1
3	-5.2	-15.7	-4.6	-13.9
3.5	-8	-16.6	-5.7	-14.3

V tabulce 5.1 jsou uvedeny procentuální odchylky z měření pomocí EMI-měřidla Flo-Mate 2000 při natočení v horizontální rovině při jízdě vozíku v kalibrační trati. Autor provedl měření v rozsahu rychlostí od minimálních hodnot až po rychlosti dosahující 3,5 m/s s tím, že byly voleny pouze odklony 10° a 20°, a to vpravo a vlevo (obr. 5.1). Lze konstatovat, že hodnoty získané pro shodné úhly s natočením vpravo či vlevo jsou z hlediska věcné přesnosti shodné (v rámci symetrie) tak, jak je tomu například u vodoměrných vrtulí. Autor připomíná, že hodnoty v tabulce v relativním vyjádření odpovídají úrovni rychlosti 0,1 m/s, to je však třeba brát s rezervou vzhledem k nízkým absolutním rychlostem.



Obr. 5.1 Natočení měřidla (vlevo ve vertikální rovině, vpravo v horizontální rovině)

V tabulce 5.2 jsou uvedeny procentuální odchylky z měření pomocí stejného měřidla při natočení v rovině vertikální. Rozsahy rychlostí jsou taktéž voleny od minimální hodnoty až po rychlost 3,5 m/s s tím, že autor volil jiné úhly a to 6° při odklonu nosné tyče dozadu (čelo snímače je blíže ke dnu) a 10° při odklonu nosné tyče dopředu (čelo snímače je výše než jeho zadní část), pro lepší pochopení je přiložen obr. 5.1. Z tabulky lze pozorovat, že pro identické úhly (10°) nejsou hodnoty získaných relativních odchylek ve shodě, tudíž se měřidlo z tohoto pohledu nechová „symetricky“.

Tab. 5.2 Směrová charakteristika měřená ve vertikální rovině pro Flo-Mate 2000 vyjádřena relativními odchylkami dle [13]

FLO-MATE, Nr 2'002'180			
Rozdíl rychlosti vozíku a rychlosti měřené pomocí Flo-Mate			
Úhel [°]	-6 (dozadu)	-10 (dozadu)	10 (dopředu)
Rychlost	Odchylka	Odchylka	Odchylka
$u_a$	$\epsilon$	$\epsilon$	$\epsilon$
[m/s]	[%]	[%]	[%]
0.01	-4.0	-15.0	-2.0
0.02	-10.5	-7.5	-7.5
0.03	-11.3	-17.3	-15.7
0.04	-7.3	-79.0	-15.5
0.05	-5.0	-26.4	-14.2
0.10	-8.2	-17.4	-10.7
0.20	-7.8	-12.6	-7.3
0.50	-8.4	-8.1	4.3
0.90	-	-	-3.7
1.00	-4.9	-6.7	-
1.50	-3.9	-7.2	-
2.00	-3.6	-5.0	-
2.50	-2.6	-5.1	-
3.00	-3.4	-5.8	-
3.50	-4.1	-6.6	-

## 6 CÍL A MOTIVACE PRÁCE

V předchozích kapitolách bylo zmíněno, že úřední měření průtoku vody v přirozených korytech velkých vodních toků je prováděno primárně dle ČSN ISO 748 [2] a u menších profilů, které se odlišují geometrickými i proudovými okrajovými podmínkami je úřední měření prováděno dle metrologického předpisu MP 010 [3]. Tyto normy a předpisy jsou zaměřené pouze na vodoměrné vrtule, které jsou jedinými variantami měřidel úředního měření v otevřených korytech. Vzhledem k nutnosti reagovat na požadavky praxe, která již několik let používá při měření průtoků v otevřených korytech EMI-měřidla, je nutno zabývat se touto problematikou.

Experimentální práce probíhaly v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Veškeré potřebné okrajové podmínky budou postupně popsány v kapitole 7.

Experimentální práce měly dva základní cíle a to:

- posoudit vliv turbulence na hodnotu nejistoty měření bodové rychlosti proudu za použití EMI-měřidel a
- posoudit směrovou citlivost vybraných snímačů.

U obou cílů bylo měření realizováno při třech rychlostech.

U posouzení vlivu turbulence byly rychlosti v rozsahu od 0,10 m/s do 0,55 m/s s tím, že v laboratorní trati byly simulovány intenzity turbulence proudu s minimální a střední hodnotou intenzity. V rámci těchto laboratorních zkoušek, které jsou uvedeny v kapitole 7.3, se bude možné vyjádřit k tématům:

- velikost nejistoty měření bodové rychlosti za využití EMI-měřidel;
- posouzení shody mezi výsledky vykazovanými EMI-měřidly a vodoměrnou vrtulí.

U posouzení směrové citlivosti vybraných snímačů se rychlost pohybovala v okolí hodnot 0,08 m/s, 0,3 m/s a 0,7 m/s. Posuzovaná měřidla byla odkloněná v horizontální i vertikální rovině. V horizontální rovině k natékajícímu proudu byl odklon  $\pm 20^\circ$ , ve vertikální pak  $\pm 10^\circ$ . V rámci tohoto výzkumu, který je uveden v kapitole 7.4, se bude možné vyjádřit k tématům:

- komponentní vlastnosti vybraných měřidel při odklonu snímače v horizontální rovině;
- komponentní vlastnosti vybraných měřidel při odklonu snímače ve vertikální rovině;
- porovnání vlastností posuzovaných měřidel s chováním vodoměrné vrtule.

**Poznámka:** Předložená práce je prezentací výsledků experimentálního výzkumu, jenž byl realizován autorem diplomové práce a jeho vedoucím v roce 2020 v rámci úkolů Programu rozvoje metrologie ÚNMZ a z něhož vznikl dokument [13]. Řada v práci uvedených vyjádření je tak s dokumentem shodná.

## 7 PRŮBĚH EXPERIMENTÁLNÍCH PRACÍ

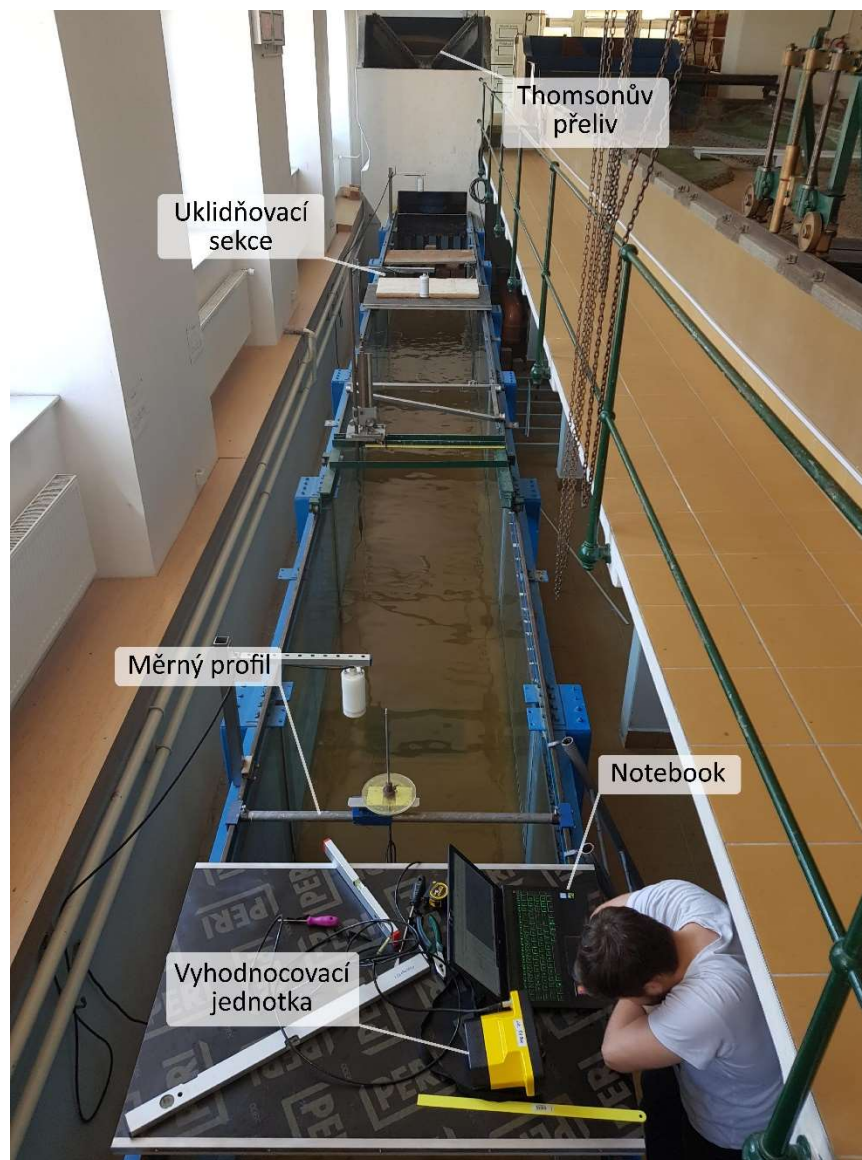
Z kapitoly 4 je zřejmé, že stanovení nejistoty měření bodové rychlosti proudu je závislé na více faktorech (pro připomenutí: typ měřidla bodové rychlosti, absolutní hodnota měřené rychlosti, intenzita turbulence proudu, doba měření bodové rychlosti v měrném bodě, pozice měřidla vzhledem k natékajícímu proudu).

Experimentální část práce je zaměřená na intenzitu turbulence proudu a pozici měřidla vzhledem k natékajícímu proudu tak, jak bylo popsáno v kapitole 6. V následujících kapitolách bude taktéž popsán hydraulický okruh laboratoře a při experimentálních pracích použita EMI-měřidla.

### 7.1 Hydraulický okruh laboratoře

Experimentální část diplomové práce probíhala na měrném žlabu v laboratoři nacházející se v budově B Vysokého učení technického v Brně. Hydraulický měrný žlab dlouhý 14 metrů a široký 1 metr lze vidět na obr. 7.1. Maximální kapacita žlabu je 160 l/s a je napojen na hydraulický okruh laboratoře.

Hydraulický okruh fungoval v recirkulačním provozu napojeným na akumulární nádrž, ve které se nacházelo čerpadla ovladatelná buď ručním nebo automatickým režimem. K měření průtočného množství sloužil Thomsonův měrný přeliv umístěný před měrnou tratí.



*Obr. 7.1 Protiproudňní pohled na měrný žlab*

K nastavování úrovně hladiny bylo používáno digitální hrotové měřidlo a pro regulaci hladiny pak vertikální žaluzie nacházející se na konci žlabu. Přesná úroveň hladiny nebyla pro měření rozhodující, ale v kombinaci s průtočným množstvím byla okrajovou podmínkou pro přibližné nastavení rychlosti.

Před vertikálními žaluziemi se nacházela oblast měření (měrný profil) (obr. 7.2) s tím, že posuzované EMI-měřidlo zde bylo uchyceno na klasické hydrometrovací tyči o průměru 9 mm. Tyč byla upevněna do speciálního, pro tyto účely vyrobeného nosného zařízení, které umožňovalo snímač měřidla umístit do libovolného místa v měrném profilu. Součástí tohoto nosného zařízení byl úhломěr se stupnicí na 360° pro nastavení úhlu natočení při měření směrové citlivosti.





*Obr. 7.2 Nosné zařízení pro EMI-měřidlo*

V měrném žlabu byla dále měřena teplota pomocí vpichovacího kalibrovaného teploměru a hodnota měrné vodivosti vody, která, jak už bylo zmíněno dříve, je důležitým faktorem při správném fungování EMI-měřidel. Hodnota měrné vodivosti byla stanovena pomocí přenosného konduktometru DiST 3 EC Tester.

Pro stanovení vlivu turbulence na hodnotu nejistoty měření bylo potřeba do měrného žlabu účelově instalovat rušící prvek, který vytvářel příslušnou (vyšší) intenzitu turbulence. Z předchozích výzkumů [5] a [12] s vodoměrnými vrtulemi jsme zjistili, že nejjednodušším a dostatečně účinným prvkem je svisle protiproudě umístěné prkno před měrným profilem. Hodnotu intenzity turbulence lze velmi citlivě měnit půdorysnou změnou vzdálenosti měrného profilu a prkna při „konstantní“ hodnotě rychlosti v měrném žlabu.

## **7.2 Posuzované typy EMI-měřidel**

K experimentální zkoušce byly využity čtyři EMI-měřidla, jedno ve vlastnictví řešitele (Vysoké učení technické v Brně), dvě vypůjčené od DHI a.s. a jedno od Brněnských vodáren a kanalizací, a.s. (BVK a.s.). Dále byla použita jedna vodoměrná vrtule, taktéž ve vlastnictví Vysokého učení technického v Brně (VUT). Zaměříme se nyní na přiblížení technických a metrologických parametrů těchto měřidel.

### 7.2.1 EMI-měřidlo Valeport-Cylindrical – 801

EMI-měřidlo Valeport-Cylindrical model 801 se nachází na obr. 7.3 a bylo vypůjčeno od společnosti DHI a.s.

Na obrázku je zobrazena celá sestava vyhodnocovací jednotky s kabelem a válcovým snímačem, kterou jsme pro měření použili. Z vyhodnocovací jednotky lze snadno naměřené hodnoty exportovat pomocí konektoru RS 232 do počítače. K napájení jednotky se využívají alkalické baterie. Elektrody se nacházejí na stranách měřicího snímače a tvoří kolem sebe měřicí „objem“ ve tvaru koule o průměru cca 120 mm, proto jsou rychlosti měření vyhodnocovány „symetricky“ z celého okolí snímače. Rozpětí hodnot pro měření bodové rychlosti je (-5,0 – +5,0) m/s. [10] [17]



*Obr. 7.3 EMI-měřidlo Valeport-Cylindrical model 801 s příslušenstvím*

### 7.2.2 EMI-měřidlo Valeport-Flat – 801

EMI-měřidlo Valeport-Flat model 801 vidíme na obr. 7.4 a bylo taktéž zapůjčeno společností DHI a.s.

Na fotce je zobrazena celá sestava vyhodnocovací jednotky s kabelem a válcovým snímačem. Z vyhodnocovací jednotky lze snadno naměřené hodnoty exportovat pomocí konektoru RS 232 do počítače. K napájení jednotky se využívají alkalické baterie. Elektrody



se nacházejí na horní části snímače, proto je rychlost měřená pouze bezprostředně nad horní plochou snímače. Rozpětí hodnot pro měření bodové rychlosti je  $(-5,0 - +5,0)$  m/s. [10] [17]



*Obr. 7.4 EMI-měřidlo Valeport-Flat model 801 s příslušenstvím*

### **7.2.3 EMI-měřidlo Marsh-McBirney FLO-MATE 2000**

EMI-měřidlo March-McBirney model Flo-Mate 2000 se nachází na obr. 7.5 a bylo zapůjčeno společností BVK a.s.

Vyhodnocovací jednotka tohoto modelu má pouze 19 paměťových míst v datovém prostoru. V porovnání s ostatními přístroji, které nabízí cca 1000 hodnot, je to docela málo. Výhodou jednotky může být vypnutí displeje a zobrazení indikátoru šumu při zjištění velkého množství elektrického šumu v měřeném úseku nebo vypnutí jednotky (po 5 minutách) při ztrátě vodivosti. Rychlosti měřené snímačem od Flo-Mate 2000 jsou vyhodnoceny „symetricky“ z celého jeho okolí. Rozpětí hodnot pro měření bodové rychlosti je  $(-0,15 - +6,0)$  m/s. [10] [17]



*Obr. 7.5 EMI-měřidlo March-McBirney FLO-MATE 2000 s příslušenstvím*

#### **7.2.4 EMI-měřidlo OTT Hydromet MF Pro**

EMI-měřidlo typu OTT Hydromet MF Pro je vyobrazeno na obr. 7.6 a je ve vlastnictví Vysokého učení technického v Brně.

Na fotce je zobrazena celá zkoušená sestava vyhodnocovací jednotky s kabelem a válcovým snímačem. Přístroj může mít snímač hloubky (svislá vzdálenost hladiny a snímače). Vyhodnocovací jednotka má barevný displej a velký datový prostor měřených hodnot, které jdou jednoduše exportovat do počítače pomocí rozhraní USB. Rozpětí hodnot pro měření bodové rychlosti je (0,0 – 6,0) m/s. [10] [17]





*Obr. 7.7 EMI-měřidlo OTT HydroMet MF Pro s příslušenstvím*

### **7.3 Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti**

V této kapitole bude popsán průběh měření proudových podmínek charakterizovaných intenzitou turbulence, následně bude provedeno jeho vyhodnocení.

#### **7.3.1 Průběh experimentálních prací**

Na základě měření vodoměrnou vrtulí s propelerem č.1 v reálných tratích prizmatických profilů probíhajících v roce 2002 [5] [12], byla stanovena intenzita turbulence v těchto tratích přibližně v rozsahu  $T_u = (2 - 15) \%$ . Taktéž v této diplomové práci bylo třeba měření provádět za použití vodoměrné vrtule s propelerem č.1, aby byl zajištěn identický přenos proudových parametrů (rychlostí a jejich intenzit turbulence) z in situ do měrné trati hydraulické laboratoře při posouzení dvou vybraných typů EMI-měřidel (MF-Pro a Flo-Mate 2000).

Měření bylo provedeno v souladu s doporučením norem ČSN ISO 1088 [4] a ČSN 25 9312 [14], ve kterých je stanoveno, že nejistoty při měření bodové rychlosti v závislosti na době měření se určí na základě měření turbulence v měrném bodě (nepřerušené měření po dobu 2000 s s odečítáním každých 10 s) a z ní vypočtené autokorelační funkce. Měrný bod byl umístěn ve střední části průtočného profilu, aby byl eliminován vliv stěn žlabu a zvýšené turbulence vyskytující se u hladiny.

Na základě předchozích výzkumů uvedených například v [5] a [12], a dále převzetí jejich výsledků do MP 010 [3] bylo rozhodnuto, že měření bude realizováno pro tři rychlosti a dvě intenzity turbulence tak, jak je uvedeno v tabulce 7.1. Veškeré grafické výstupy pro jednotlivé okrajové podmínky lze nalézt v příloze této práce.

Tab. 7.1 Definice a označení okrajových podmínek simulovaných v měrné trati laboratoře

Rychlost	A	„Malá rychlost“ – Rychlost proudu přibližně 0.1 m/s
	B	„Střední rychlost“ – Rychlost proudu přibližně 0.3 m/s
	C	„Velká rychlost“ – Rychlost proudu přibližně 0.5 m/s
Turbulence	a	"Nízká intenzita turbulence" – Turbulence simulovaná bez geometrických úprav měrné trati
	b	"Střední intenzita turbulence" – Turbulence simulovaná překážkou v měrné trati umístěnou cca 2 m protiproudě před měrným profilem instalace posuzovaného měřidla

Pro všechny okrajové podmínky (uvedené v tabulce 7.1) byl sestaven formulář, jehož příklad ve zkrácené podobě je znázorněn na obrázku 7.8. V záhlaví jsou uvedeny informace o datu měření, typech měřidel a dalších parametrech měření.

Elektromagnetické indukční měřidlo MF-Pro - s turbulencí			
Číslo měření:	1		
Datum měření:	22.07.2020		
Majitel:	Vysoké učení technické v Brně		
Teplota	T =	°C	
Konduktivita	$\sigma =$	$\mu\text{s/cm}$	
Šířka žlábu	$\delta =$	1010 mm	
Hloubka vody	$h =$	310 mm	
Průtok lab.	$Q_L =$	30.30 l/s	
Rychlost lab.	$u_L =$	0.097 m/s	
Rychlost prů.	$v =$	0.0853 m/s	
Koeficienty rovnic:	$v = a + n \cdot b$		
	$a =$	0.085231343 m/s	
	$b =$	6.398E-08	
Střední rychlost vyrov.	$u =$	0.0854 m/s	
Intenzita turbulence	$Tu =$	0.1156	-
Směr. odchylka pro $t_{0.05}$	$S_{u,0.05} =$	0.00987 m/s	
Koeficient rozšíř. nejist.	$K_{0.95} =$	2	-
Rozšířená nejistota	$U =$	0.01973 m/s	
Min. hodnota po vyrovnaní	$u_{min} =$	0.0571 m/s	
Max. hodnota po vyrovnaní	$u_{max} =$	0.1081 m/s	

Čas	Čas	Rychlost	Rychlost vyrovnaná	Autokorelační funkce	Horní mez nezávislosti
$t$	$t$	[m/s]	[m/s]	[-]	[-]
10	0	0.086	0.0861	1.00000	0.1414
10	10	0.089	0.0891	0.99600	0.1427
10	20	0.104	0.1041	0.96092	0.1432
10	30	0.086	0.0861	0.91435	0.1433
10	40	0.079	0.0791	0.87892	0.1441
10	50	0.076	0.0761	0.81964	0.1442
10	60	0.093	0.0931	0.86057	0.1447
10	70	0.067	0.0671	-0.00856	0.1447
10	80	0.093	0.0931	-0.04606	0.1450
10	90	0.087	0.0871	-0.01258	0.1450
10	100	0.095	0.0951	-0.13350	0.1475
10	110	0.076	0.0761	-0.15969	0.1509
10	120	0.083	0.0831	-0.03436	0.1510
10	130	0.078	0.0781	0.03472	0.1512
10	140	0.077	0.0771	0.01861	0.1512
10	150	0.084	0.0841	-0.02203	0.1513
10	160	0.101	0.1011	-0.03227	0.1514
10	170	0.090	0.0901	0.00286	0.1514
10	180	0.072	0.0721	-0.05421	0.1518
10	190	0.093	0.0931	-0.05980	0.1523
10	200	0.094	0.0941	-0.07025	0.1529
10	210	0.082	0.0821	-0.11747	0.1547
10	220	0.070	0.0701	-0.03721	0.1549
10	230	0.080	0.0801	0.01752	0.1550
10	240	0.091	0.0911	-0.21441	0.1608
10	250	0.087	0.0871	-0.15469	0.1637
10	260	0.084	0.0841	-0.07652	0.1644
10	270	0.071	0.0711	-0.05601	0.1648
10	280	0.082	0.0821	-0.11056	0.1663
10	290	0.102	0.1021	-0.06717	0.1668
10	300	0.089	0.0891	-0.04246	0.1671
10	310	0.093	0.0931	-0.11107	0.1685
10	320	0.094	0.0941	-0.03961	0.1686
10	330	0.087	0.0871	-0.09301	0.1697

Počet opakování	Čas	Směrodatní odchylka	Rozšířená nejistota	Relativní nejistota	Absolutní hodnota	Procenta	Kvantil (zastoupení)
n-	n · t <sub>g</sub>	[m/s]	[m/s]	[%]	[m/s]	[%]	[-]
1	10	0.009865763	0.009865763	0.0197	23.12	0.0008	0
2	20	0.007303338	0.006976148	0.0146	17.11	0.0038	0.1
3	30	0.006157521	0.005696001	0.0123	14.43	0.0018	0.2
4	40	0.005430866	0.004932881	0.0109	12.72	0.0008	0.3
5	50	0.004971703	0.004412103	0.0099	11.65	0.0062	0.4
6	60	0.004618218	0.004027681	0.0092	10.82	0.0092	0.5
7	70	0.004336575	0.003728908	0.0087	10.16	0.0078	0.6
8	80	0.004121139	0.003488074	0.0082	9.66	0.0182	0.68
9	90	0.00392958	0.003288588	0.0079	9.21	0.0078	0.7
10	100	0.003749148	0.003119828	0.0075	8.78	0.0018	0.8
11	110	0.003593981	0.002974639	0.0072	8.42	0.0098	0.9
12	120	0.003482315	0.002848	0.0070	8.16	0.0092	0.95
						0.0022	1
						0.0072	
						0.0082	
						0.0012	
						0.0158	
						0.0048	
						0.0132	
						0.0078	
						0.0088	
						0.0032	
						0.0152	
						0.0052	
						0.0058	
						0.0018	
						0.0012	
						0.0142	
						0.0032	
						0.0168	
						0.0037	
						0.0077	
						0.0087	
						0.0017	

Obr. 7.8 Formulář jednotlivých měření

Nejdříve probíhalo měření pomocí vodoměrné vrtule s propelerem č.1, každých 10 s (do hodnoty 2000 s) se pomocí automatizovaného sběru získal počet otáček, který se dále dle odpovídajícího vztahu (3.3) převedl na hodnotu bodové rychlosti. Při měření s EMI-měřidly bylo možné zapisovat hodnotu bodové rychlosti přímo. Rychlosti byly dále dle [8] upraveny vztahem pro opravu při neustálených podmínkách ve smyslu vztahu:

$$u_i' = u_i - \{[a(t_i - \bar{t}) + b] - \bar{v}\}, \quad (7.1)$$

kde  $u_i'$  je opravená okamžitá rychlost pro eliminaci lineárního trendu pozorovaných rychlostí;

$u_i$  je naměřená okamžitá rychlost v čase  $t_i$ ;

$\bar{t}$  je střední hodnota v celém časovém intervalu měření;

$\bar{v}$  je střední rychlost;

$a$  a  $b$  jsou konstanty stanovené dle [8].

Nadále se bude používat pouze opravená okamžitá rychlost  $u_i'$ , kterou budeme pro naši potřebu značit jako  $u_i$ . Z opravených hodnot byla pro všechny okrajové podmínky spočtena průměrná rychlost  $u$ , která je uvedena v tabulce 7.2. V tabulce je pro představu zapsána i intenzita turbulence  $T_u$ , která je stanovena ve smyslu (4.21).

Tab. 7.2 Parametry realizovaných měření v závislosti na kombinaci okrajových podmínek

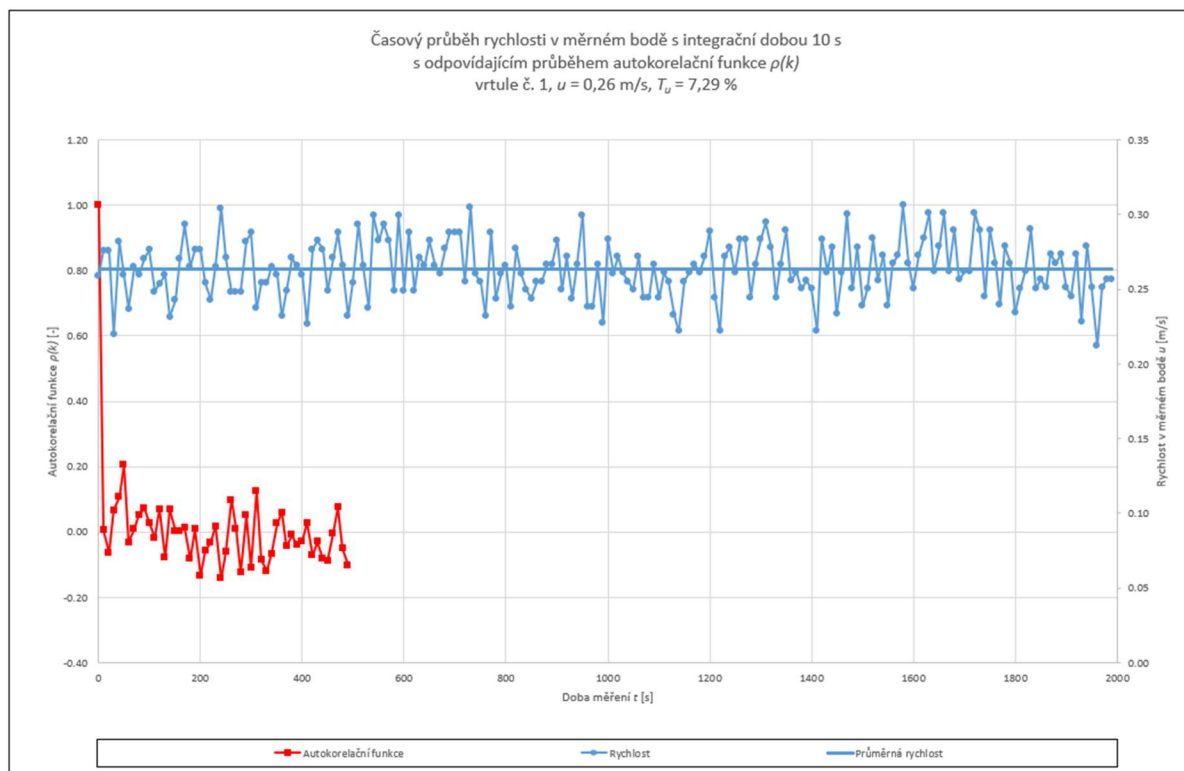
OKRAJOVÁ PODMÍNKA	Vrtule s propelerem č. 1		Flo-Mate 2000		MF Pro	
	Vykazovaná bodová rychlost	Intenzita turbulence	Vykazovaná bodová rychlost	Intenzita turbulence	Vykazovaná bodová rychlost	Intenzita turbulence
	$u$ [m/s]	$T_u$ [%]	$u$ [m/s]	$T_u$ [%]	$u$ [m/s]	$T_u$ [%]
<b>Aa</b>	0.110	4.42	0.104	4.69	0.106	4.37
<b>Ab</b>	0.095	9.38	0.085	12.78	0.085	11.56
<b>Ba</b>	0.317	3.57	0.327	3.25	0.315	3.35
<b>Bb</b>	0.263	7.29	0.257	7.49	0.247	7.35
<b>Ca</b>	0.545	2.72	0.561	2.47	0.549	2.39
<b>Cb</b>	0.480	4.41	0.487	5.11	0.454	4.81

### 7.3.2 Vyhodnocení vlivu turbulence

V následujících odstavcích budou prezentovány vybrané výsledky pro posuzovaná EMI-měřidla a vodoměrnou vrtuli s propelerem č. 1.

Ukázka záznamu 2000 s trvajícím měření s vodoměrnou vrtulí je patrná z grafu 7.1 (příloha P\_T\_1, P\_T\_2, P\_T\_3), na kterém je vyhodnocen pro kombinaci okrajových

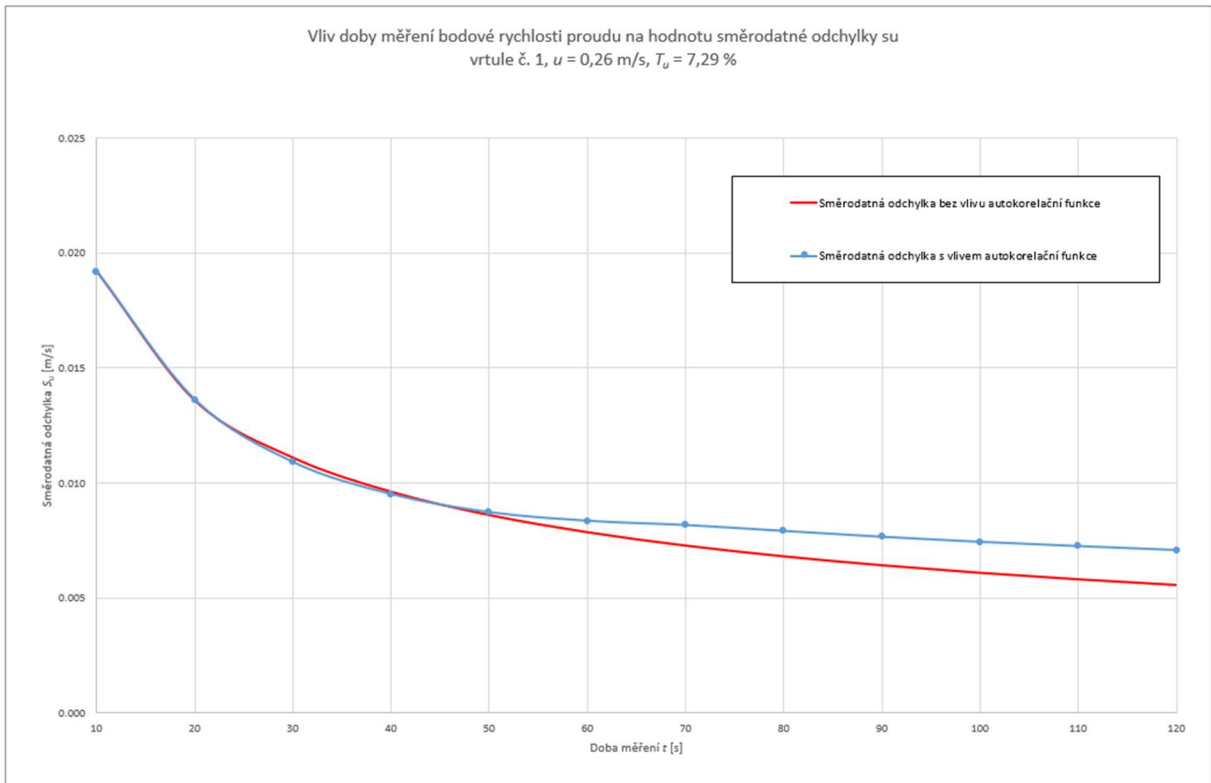
podmínek Ba časový průběh změřených rychlostí v měrném bodě společně s odpovídající autokorelační funkcí dle vztahu (4.20).



Graf 7.1 Záznam z měření a vyhodnocení při okrajových podmínkách Bb pro vodoměrnou vrtuli s propelerem č. 1

Charakter průběhu autokorelační funkce potvrzuje závěry vyvozené z výsledků monitoringu proudových podmínek in situ – na reálných prizmatických tratích uvedených v [5] a [12], to znamená, že měřené bodové rychlosti vodoměrnou vrtulí s integrační dobou 10 s nejsou za daných proudových podmínek vzájemně závislé (výsledky autokorelační funkce jsou v těsné blízkosti nuly). Tato nezávislost je charakteristická pro všechna provedená měření se všemi třemi zkoumanými měřidly. Vliv autokorelační funkce se projevuje jen nepatrně a ojediněle, spíše za velmi nízkých rychlostí a vysokých intenzit turbulence proudu.

Pokud z provedeného měření ve smyslu vztahu (4.18) určíme hodnotu směrodatné odchylky  $s_u$ , a to s vlivem i bez vlivu autokorelační funkce na její hodnotu, obdržíme výsledky, které jsou pro vodoměrnou vrtuli uvedeny v grafu 7.2, z něhož vyplývá, že vliv autokorelační funkce na výsledek průběhu tohoto parametru je opravdu zanedbatelný.



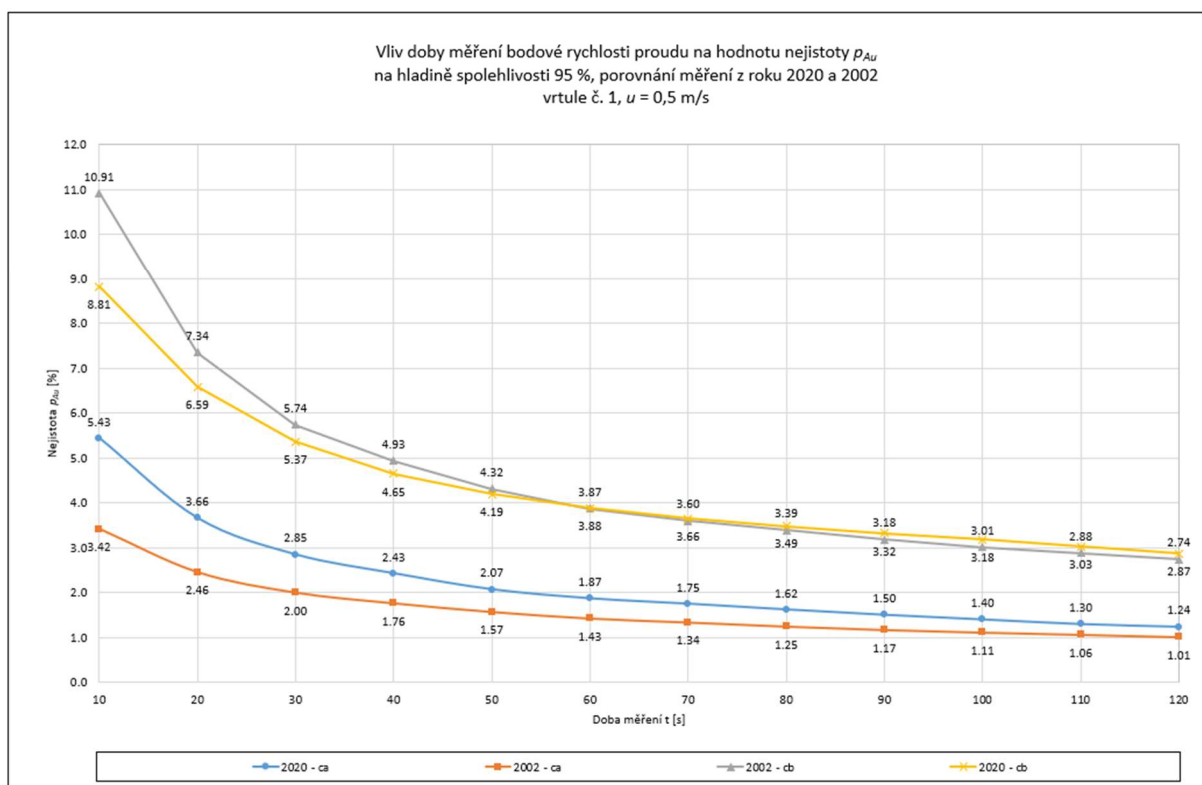
*Graf 7.2 Porovnání vlivu autokorelační funkce na hodnotu směrodatné odchyly při okrajových podmínkách Bb pro vodoměrnou vrtuli s propelerem č. 1*

Získané výsledky je následně možné transformovat ve smyslu vztahu (4.19) na hodnotu nejistoty  $p_{Au}$ . Měření bodové rychlosti in situ v jednotlivých měrných bodech nejsou zpravidla opakována, spíše se přistupuje k prodloužení doby měření. Z těchto důvodů budeme dále prezentovat hodnotu nejistoty bez apostrofu jako její konečnou hodnotu. I když byl prokázán jen zanedbatelný vliv autokorelační funkce na její velikost, budeme pro upřesnění výsledků pracovat s jejím případným vlivem.

Po prvních provedených testech a komplexním vyhodnocení měření s vodoměrnou vrtulí bylo třeba posoudit, zda výsledky související s velikostí intenzity turbulence pro příslušné rychlosti, jsou v souladu s hodnotami, ke kterým se dospělo v [12], a byly následně převzaty do MP 010 [3]. Je třeba uvést, že právě tyto hodnoty jsou dlouhodobě využívány při výpočtech nejistot průtoku v souvislosti s metodou rychlostního pole a jsou tak obecně přijaty jako vyhovující standard.



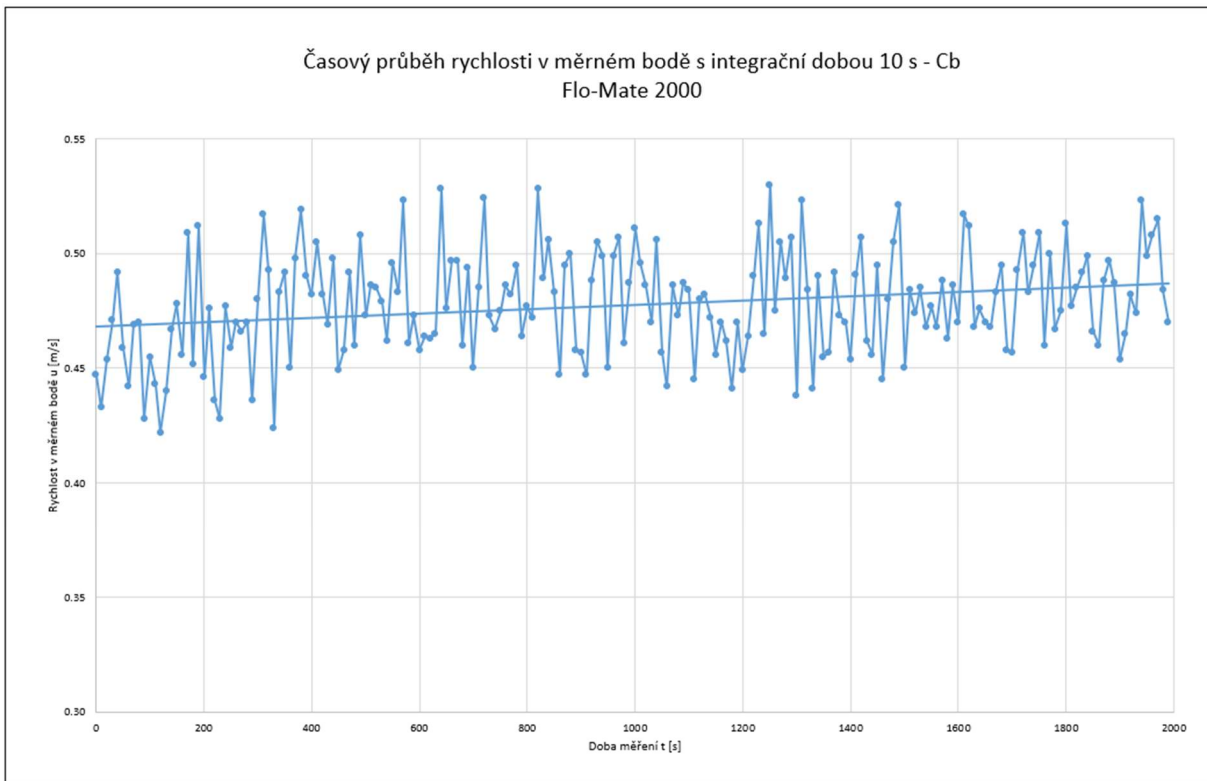
Porovnání velikosti hodnot relativních nejistot jsou uvedena v grafu 7.3 a to za nejvyšší rychlosti při nízké a střední intenzitě turbulence proudu tak, jak byly vyhodnoceny v roce 2002 a následně v roce 2020. Z průběhu křivek je patrná dobrá shoda. Lze tak konstatovat, že po téměř 18 letech jsme v laboratorních podmínkách dokázali nasimulovat identické podmínky, za kterých bylo možné opakovat shodné testy i s jinými měřidly, než jsou vodoměrné vrtule. Za těchto stejných podmínek tak byla testům podrobena i obě námi zvolená EMI-měřidla.



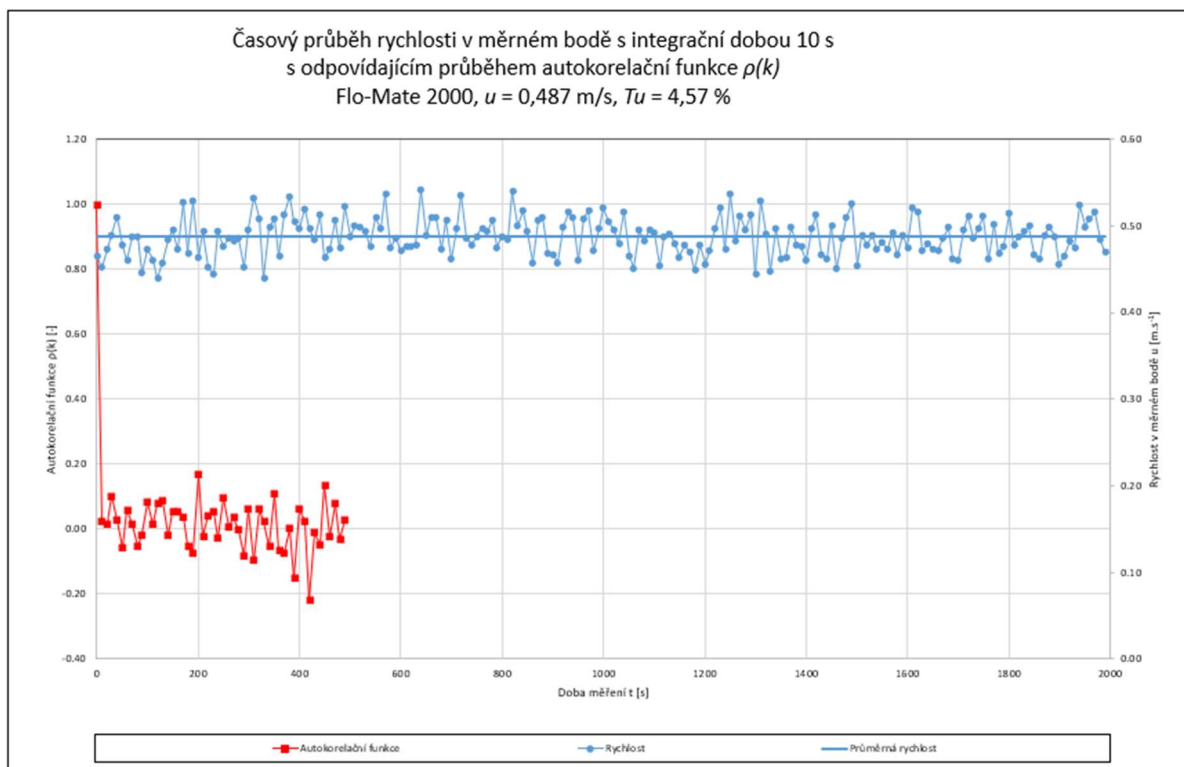
Graf 7.3 Porovnání výsledku měření vodoměrnou vrtulí z let 2002 a 2020

Na grafu 7.4 jsou uvedena data získaná při měření s Flo-Mate 2000. Záměrně jsme vybrali řadu s kombinací okrajových podmínek Cb, jelikož právě na ní je dobře vidět trend vystihující drift měřených rychlostí během zkoušek. Při většině zkoušek je tento vliv téměř nezatelný a lze jej vyčíst jen ze statických metrik k příslušným datům. Jak bylo uvedeno v předchozích odstavcích, byly tyto trendy před dalším zpracováním dat vždy eliminovány dle vztahu (7.1).





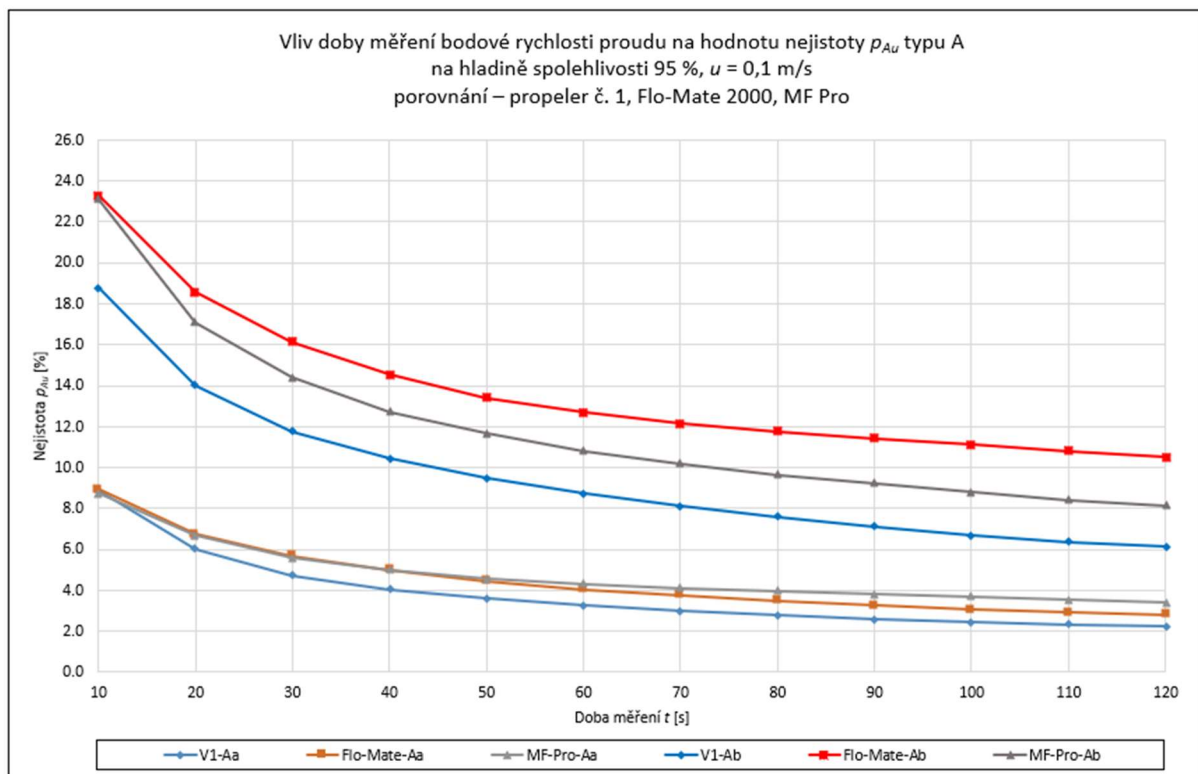
*Graf 7.4 Časový průběh rychlostí při 2000 s trvajícím měření s Flo-Mate 2000 – okrajové podmínky Cb*



*Graf 7.5 Časový průběh rychlostí za okrajové podmínky Cb včetně korelogramu pro Flo-Mate 2000*

Výsledný výstup, který jsme pro každou okrajovou podmínku uvedenou v tab. 7.1 (resp. 7.2) a příslušné měřidlo získali, je pro ukázkou uveden na grafu 7.5 (zbylé výstupy jsou uvedeny v příloze P\_T\_1, P\_T\_2, P\_T\_3). Zde je zobrazen i příslušný korelogram, z něhož je patrné, že význam autokorelační funkce na hodnoty příslušných rychlostí získávané v čase je prakticky bezvýznamný.

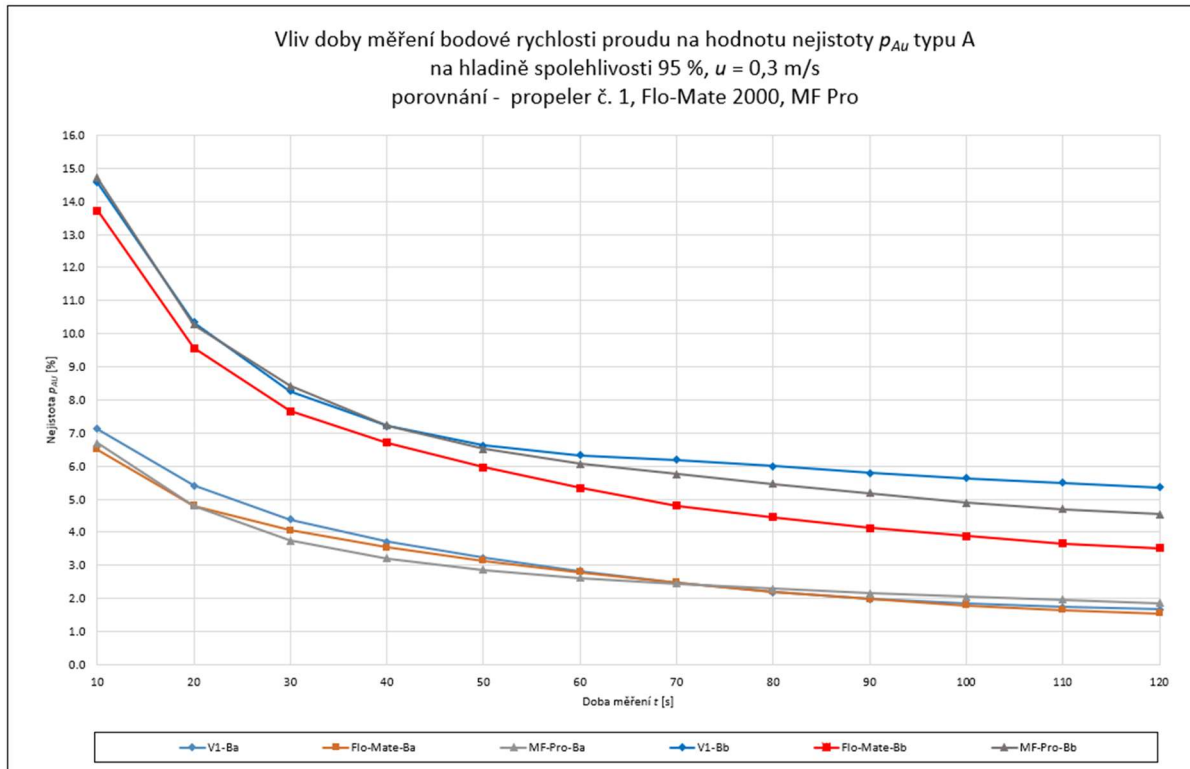
Nyní se podívejme na porovnání výsledků mezi jednotlivými měřidly vždy pro jednotlivé vztažné (orientační) rychlosti a příslušnou nízkou (značí se písmenem „a“) a střední (značí se písmenem „b“) hodnotu turbulence proudu. Začneme zhodnocením výsledků při rychlostech v okolí 0,1 m/s, které je zobrazeno na grafu 7.6. Z tohoto grafu je patrná naprostá shoda výsledků stanovených při nízké intenzitě turbulence proudu. Všechna měřidla se chovají shodně, absolutní rychlosti i jejich příslušné směrodatné odchylky, potažmo nejistoty měření jsou ve shodě.



Graf 7.6 Nejistota ve stanovení bodové rychlosti pro všechna posuzovaná měřidla při  $u = 0,1$  m/s

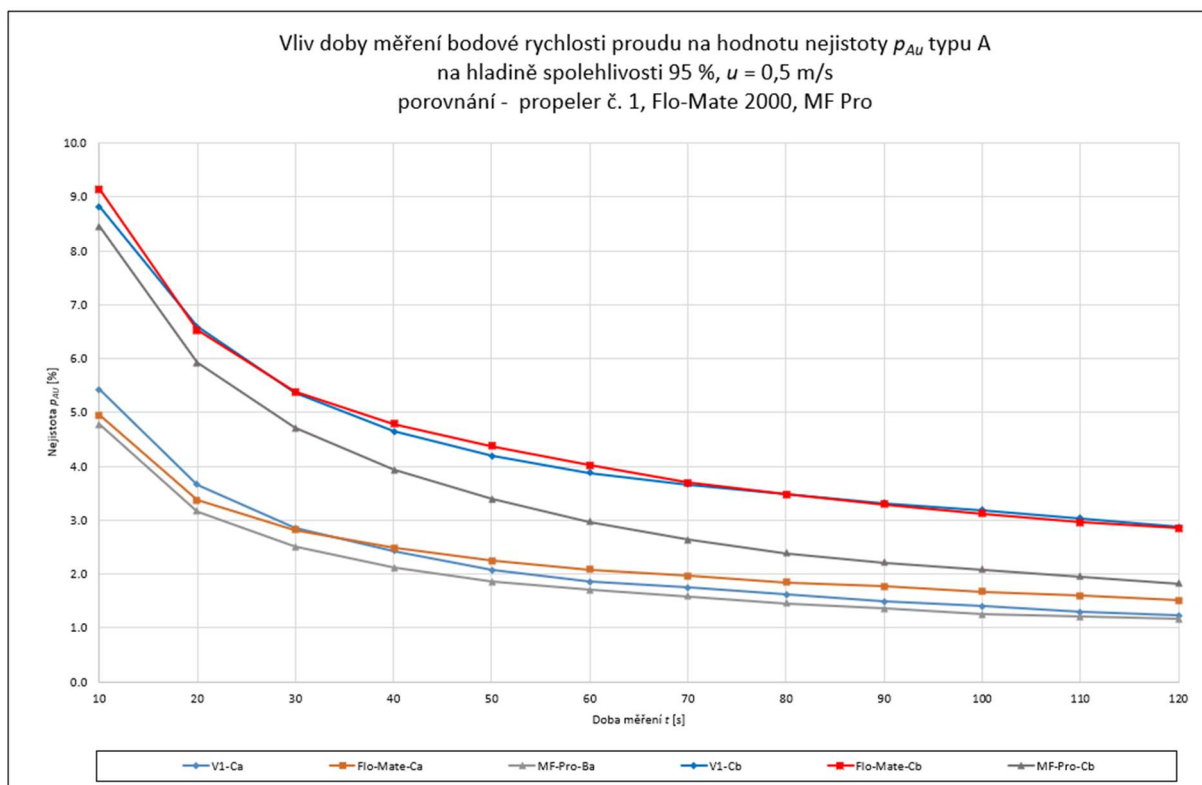
Z analýzy výsledků v těchto nízkých rychlostech dále vyplývá, že vliv absolutní hodnoty měřené rychlosti příslušnými měřidly má taktéž výrazný dopad na celkovou nejistotu měření prezentovanou v grafu 7.6. Tento vliv se projevuje viditelnými rozdíly v hodnotách získaných nejistot měření za střední intenzity turbulence proudu. Rozdíly v hodnotách mezi jednotlivými měřidly dosahují maximálně 3 %.

Na grafu 7.7 jsou analogicky vyneseny příslušné hodnoty měření bodové rychlosti proudu stanovené při rychlosti v okolí 0,3 m/s. Za nízkých i středních hodnot intenzity turbulence proudu je dosažena velmi dobrá shoda napříč všemi měřidly. Maximální rozdíly v hodnotách nejistoty měření dosahují při střední intenzitě turbulence proudu jen 1 %, tato hodnota je z hlediska věcné přesnosti naprosto zanedbatelná.



Graf 7.7 Nejistota ve stanovení bodové rychlosti pro všechna posuzovaná měřidla při  $u = 0,3$  m/s

Stejně jako pro rychlost 0,3 m/s vypadají výsledky i pro nejvyšší rychlost v okolí 0,5 m/s, ty jsou uvedeny v grafu 7.8. Z grafu je patrný malý rozdíl při vyšší intenzitě turbulence pro měřidlo MF Pro, avšak maximální rozdíly činí opět pouze 1 % a jsou způsobeny všemi dříve popsanými vlivy.



Graf 7.8 Nejistota ve stanovení bodové rychlosti pro všechna posuzovaná měřidla při  $u = 0,5$  m/s

## 7.4 Směrová citlivost

V následujícím textu bude popsán průběh a výsledky měření směrové citlivosti měřidel bodové rychlosti proudu. V horizontální rovině jsme posoudili všechna čtyři měřidla, ve vertikální rovině pouze měřidla s označením Flo-Mate 2000 a MF-Pro.

### 7.4.1 Průběh měření

V této kapitole je popsán postup měření a následně způsob vyhodnocení získaných parametrů.

Směrová citlivost čtyř EMI-měřidel byla posuzována pro tři rozdílné rychlosti natékajícího proudu. Jako referenční hodnoty uváděné ve srovnávacích tabulkách a grafech byly zvoleny rychlosti vykazované vždy příslušným měřidlem při nulovém úhlu odklonu. Rychlosti se pohybovaly v okolí hodnot 0,08 m/s, 0,3 m/s a 0,7 m/s.

Měrný bod byl volen stejně jako u intenzity turbulence ve středu měrného profilu (15 cm nad dnem měrného žlabu), aby byl eliminován vliv stěn žlabu a zvýšené turbulence vyskytující se u hladiny. V měrném bodě bylo měřeno vždy třikrát po dobu 60 s při odklonu osy snímače měřidla od směru natékajícího proudu v horizontální rovině o  $\alpha = (-6^\circ, -3^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 10^\circ, 15^\circ$  a  $20^\circ)$  a v rovině vertikální o úhel  $-10^\circ, -5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  (obr. 5.1).

Na obrázku 7.9 lze vidět vyplněný formulář měření v horizontální rovině, z něj je zřejmé i vyhodnocení příslušných hledaných parametrů  $\omega$ ,  $\varepsilon$ , a  $u_\alpha/u_0$ , které byly stanoveny ve smyslu dříve uvedených rovnic (4.22), (4.23) a (4.24). Dále se ve formuláři můžeme dočíst informace o měření, jako je například datum měření, typ měřidla, majitel měřidla, teplota vody atd.

**Elektromagnetické indukční měřidlo MF Pro (VUT)**

Číslo měření:	1
Datum měření:	24.04.2020
Označení měřidla:	338316
Majitel:	Vysoké učení technické v Brně

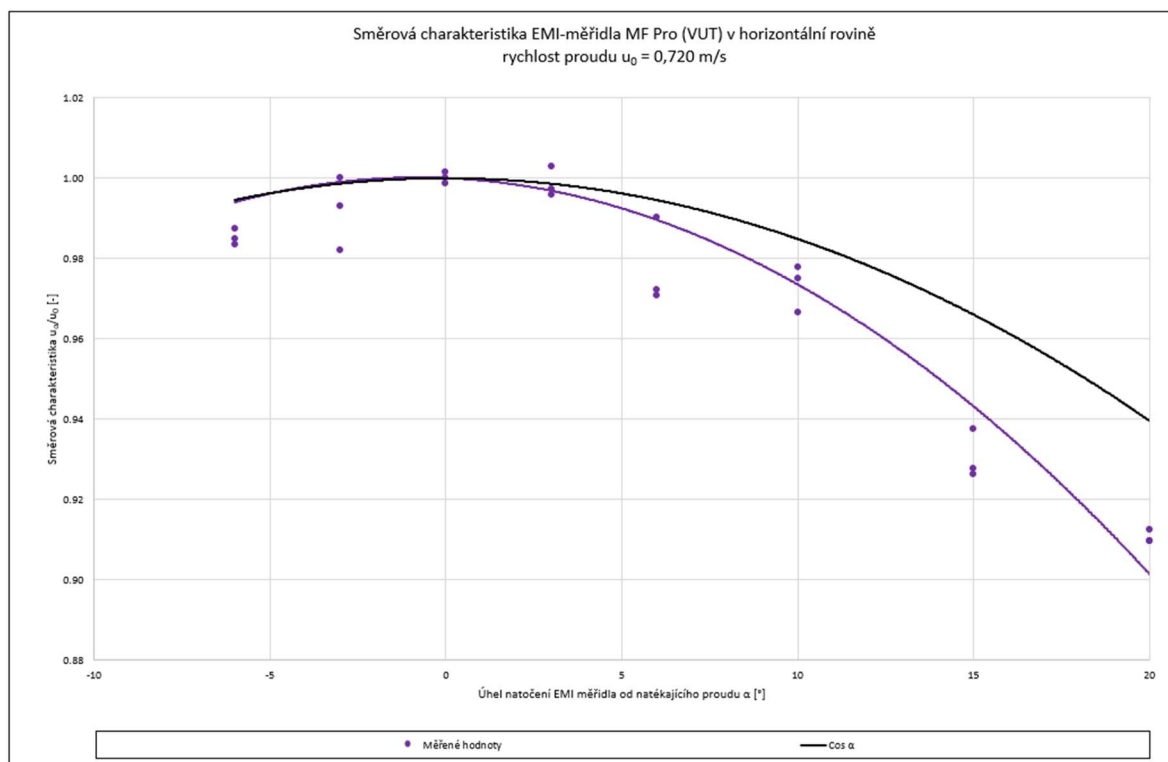
Teplota  $T = 17.3$  °C  
 Konduktivita  $\sigma = 460$   $\mu\text{S/cm}$   
 Šířka žlabu  $a = 1010$  mm  
 Hloubka vody  $h = 240$  mm  
 Průtok lab.  $Q_L = 160$  l/s  
 Rychlost lab.  $u_L = 0.660$  m/s  
  
 Rychlost  $u_0 = 0.720$  m/s (průměrná rychlost při  $\alpha = 0^\circ$ )

Číslo	Úhel	Úhel v abs. hod.	$\cos \alpha$	Čas	Rychlost	Směrová charakteristika	Odchylka $\varepsilon$	Odchylka $\omega$
$i$	$\alpha$	$\alpha$	$\cos \alpha$	$t$	$u_\alpha$	$u_\alpha/u$	$\varepsilon$	$\omega$
-	[°]	[°]	-	[s]	[m/s]	-	[%]	[%]
1	-6	6	0.995	60	0.708	0.983	-1.667	-1.125
2	-6	6	0.995	60	0.711	0.988	-1.250	-0.706
3	-6	6	0.995	60	0.709	0.985	-1.528	-0.985
4	-3	3	0.999	60	0.707	0.982	-1.806	-1.671
5	-3	3	0.999	60	0.715	0.993	-0.694	-0.558
6	-3	3	0.999	60	0.72	1.000	0.000	0.137
7	0	0	1.000	60	0.721	1.001	0.139	0.139
8	0	0	1.000	60	0.72	1.000	0.000	0.000
9	0	0	1.000	60	0.719	0.999	-0.139	-0.139
10	3	3	0.999	60	0.718	0.997	-0.278	-0.141
11	3	3	0.999	60	0.722	1.003	0.278	0.415
12	3	3	0.999	60	0.717	0.996	-0.417	-0.280
13	6	6	0.995	60	0.713	0.990	-0.972	-0.427
14	6	6	0.995	60	0.700	0.972	-2.778	-2.242
15	6	6	0.995	60	0.699	0.971	-2.917	-2.382
16	10	10	0.985	60	0.704	0.978	-2.222	-0.714
17	10	10	0.985	60	0.696	0.967	-3.333	-1.842
18	10	10	0.985	60	0.702	0.975	-2.500	-0.996
19	15	15	0.966	60	0.667	0.926	-7.361	-4.093
20	15	15	0.966	60	0.675	0.938	-6.250	-2.943
21	15	15	0.966	60	0.668	0.928	-7.222	-3.949
22	20	20	0.940	60	0.655	0.910	-9.028	-3.189
23	20	20	0.940	60	0.657	0.913	-8.750	-2.894
24	20	20	0.940	60	0.655	0.910	-9.028	-3.189

*Obr. 7.9 Formulář měření a vyhodnocení*

Ukázalo se, že průběh charakteristik stanovených v horizontální rovině měřidel odpovídá průběhu sudé funkce, to znamená, že hodnoty bodových rychlostí záporných úhlů natočení snímače  $\alpha$  odpovídají hodnotám bodových rychlostí kladným úhlům natočení, proto tyto hodnoty byly pro získání většího počtu měřených dat přiřazeny k odpovídajícím kladným úhlům. V případě měření ve vertikální rovině nebyl tento přístup zvolen a výsledky jsou prezentovány v celém měřeném rozsahu dříve uvedených úhlů.

Veškeré směrové charakteristiky měřidel jsou zpracovány tabulárně a graficky. Ve všech případech byly pro interpolaci naměřených hodnot použity polynomy druhého či třetího stupně, které v oblasti malých úhlů (do 20°) dostatečně přesně aproximují průběh směrových charakteristik. Z grafu 7.9 je patrné proložení bodů z vyhodnocených charakteristik. Tento graf je obrazem tabulárního výstupu znázorněného na obrázku 7.9.

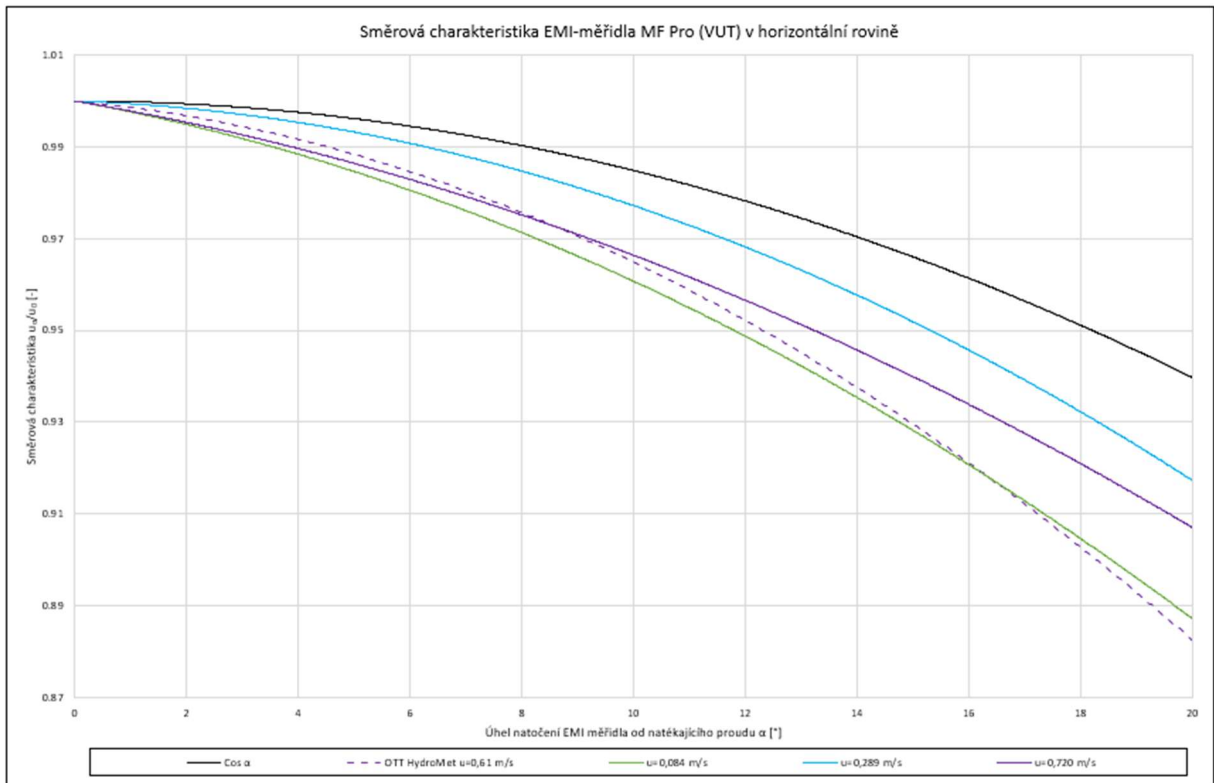


Graf 7.9 Vyhodnocení směrové charakteristiky pro MF Pro

#### 7.4.2 Vyhodnocení měření provedené v horizontální rovině

V následujících odstavcích budou prezentovány vybrané výsledky pro posuzovaná měřidla v horizontální rovině. Taktéž budou k porovnání použity podklady popisované v kapitole 5.

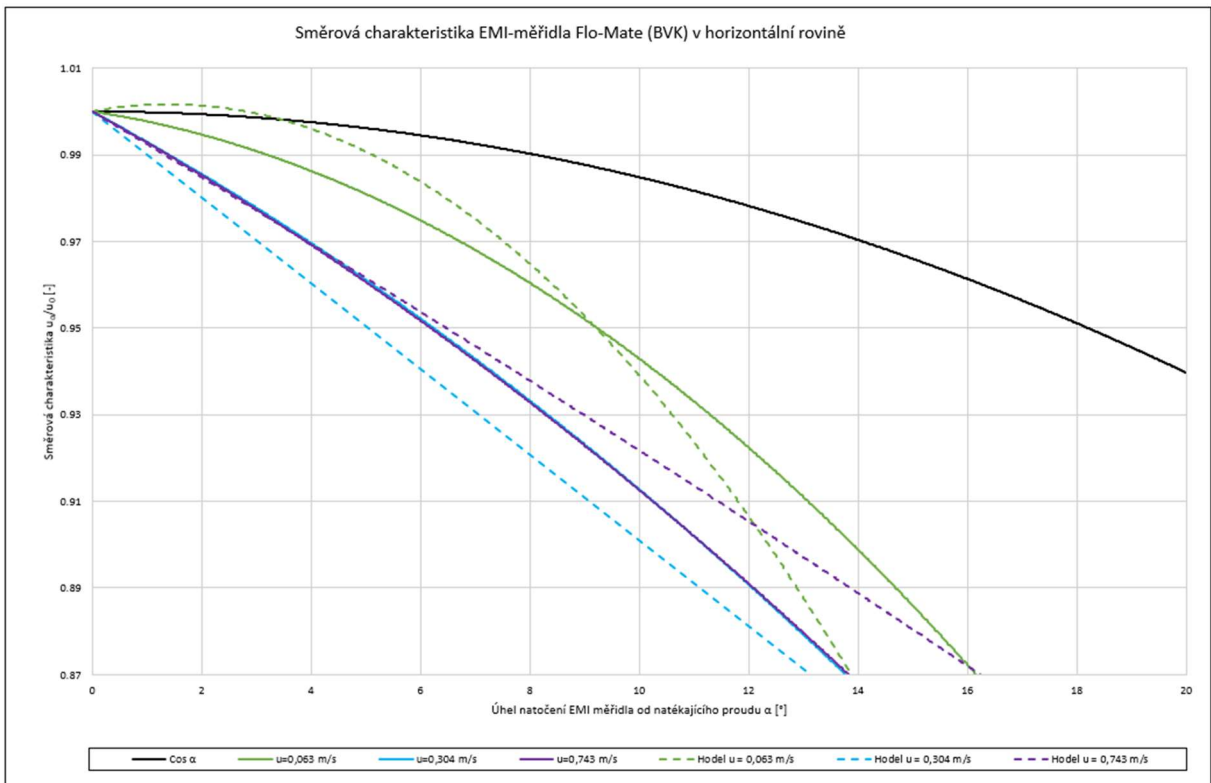
V grafu 7.10 je uvedena směrová charakteristika měřidla MF Pro vyhodnocená ve smyslu rovnice (4.24). Součástí výsledků je i průběh funkce  $\cos \alpha$  a taktéž je doplněn průběh dat, jenž byl stanoven v kalibrační laboratoři výrobce při rychlosti 0,61 m/s tak, jak bylo uvedeno v kapitole 5 dle [9]. Tyto hodnoty jsou nejbližší naší měřené hodnotě rychlosti 0,720 m/s, z tohoto důvodu byla zvolena stejná (fialová) barva pro snadnější orientaci. Lze konstatovat, že naší získané výsledky a výsledky prezentované výrobcem jsou do úhlu 10° v dobré shodě.



Graf 7.10 Směrová charakteristika v horizontální rovině pro MF Pro

Stejné grafické pojetí pro měřidlo Flo-Mate 2000 je uvedeno v grafu 7.11. Pro snadnější komparaci výsledků jsou měřítka zvolena shodně s grafem 7.11. Vzhledem k tomu, že jsou k dispozici data jiných autorů [13], a to v celém rozsahu námi měřených rychlostí, mohli jsme tato data taktéž přidat do grafu. Opět lze konstatovat velmi dobrou shodu námi naměřených dat s výsledky uvedenými v [13].

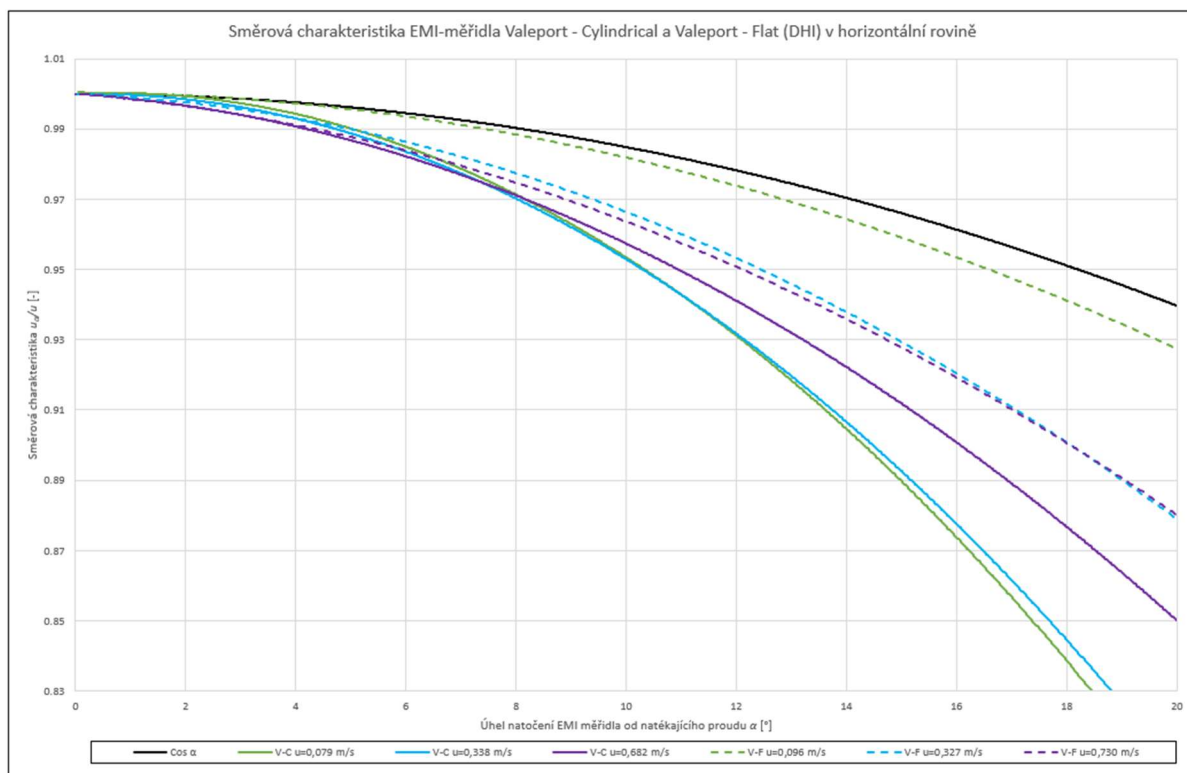




Graf 7.11 Směrová charakteristika v horizontální rovině pro Flo-Mate 2000

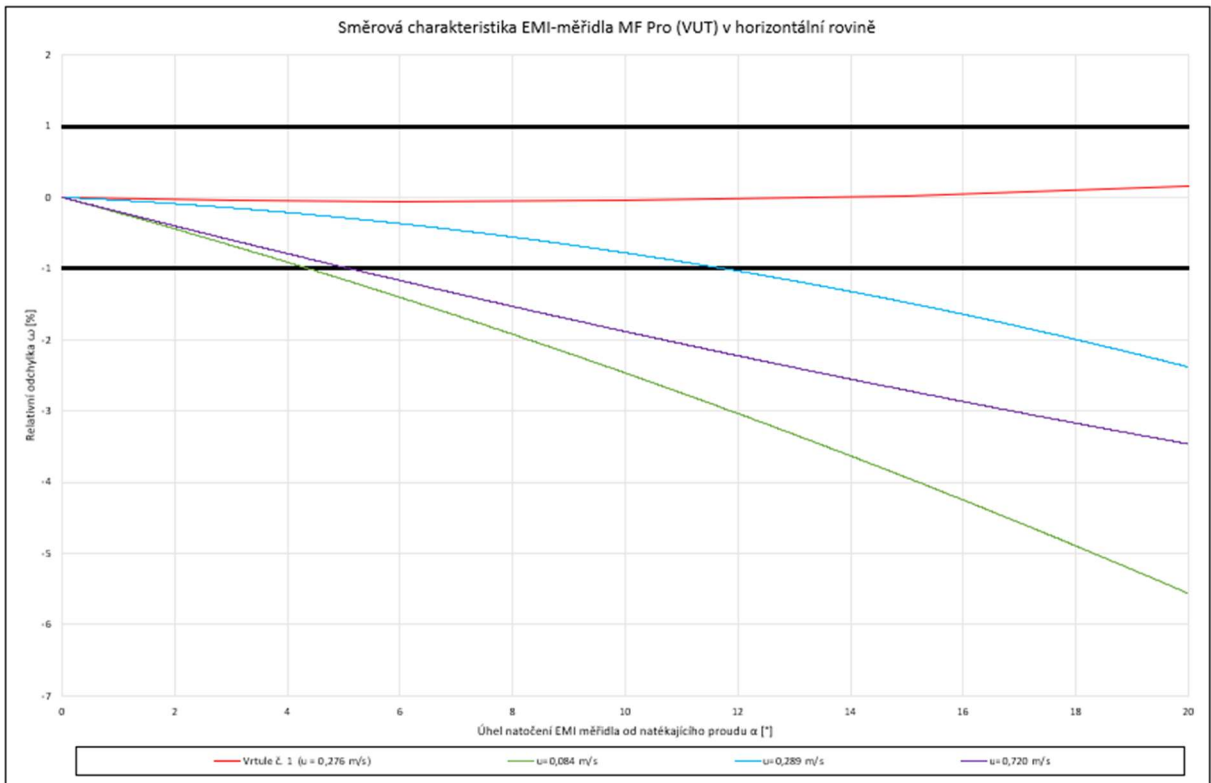
Na grafu 7.12 lze vidět průběh směrové charakteristiky pro zbylá dvě měřidla, pro velký objem dat jsme tato EMI-měřidla vložili do jednoho grafu, kde Valeport-Cylindrical je charakterizován plnou čarou a Valeport-Flat čárkovanou čarou.



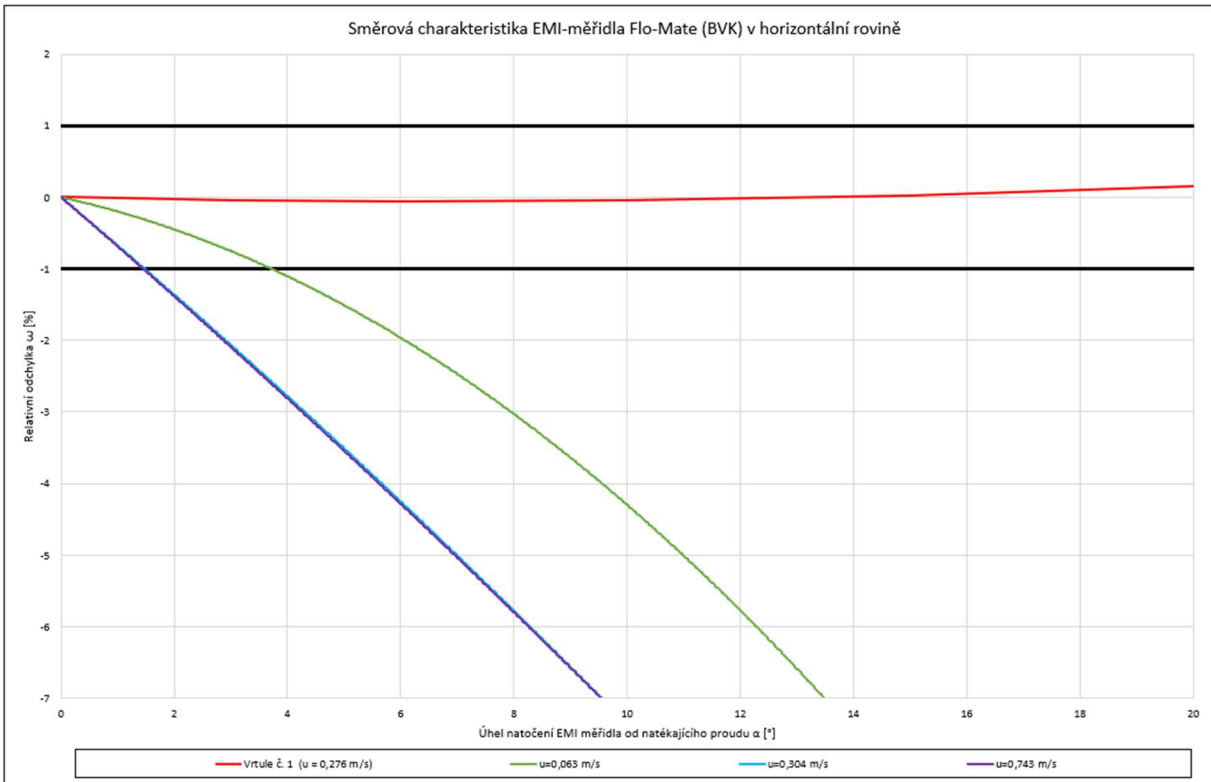


Graf 7.12 Směrová charakteristika v horizontální rovině pro Valeport-Cylindrical (plná čára) a Valeport-Flat (čárkovaná čára)

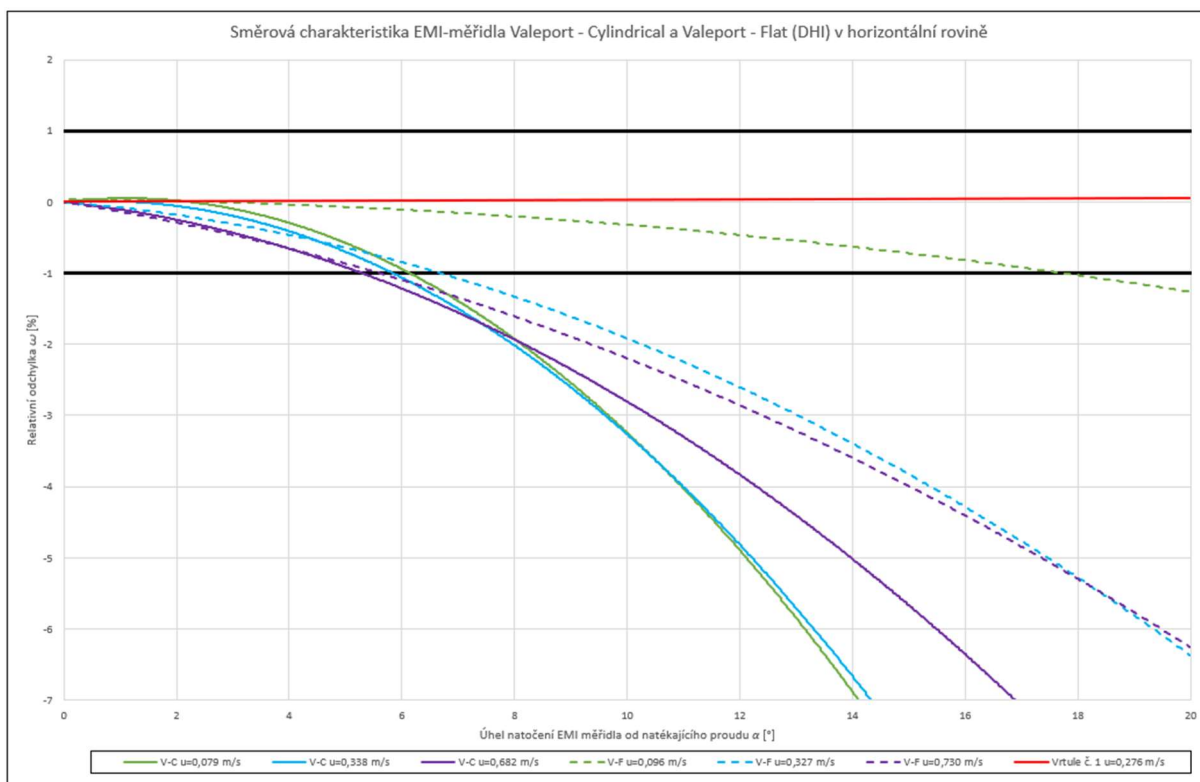
Z grafického porovnání všech čtyř měřidel je patrné, že Flo-Mate 2000 vykazuje hodnoty nejdál od průběhu funkce  $\cos \alpha$ . Shoda s funkcí  $\cos \alpha$  reprezentující míru komponentnosti je vyjádřena odchylkou  $\omega$  definovanou vztahem (4.23). Grafické vyjádření průběhu tohoto parametru v závislosti na úhlu odklonu od směru natékajícího proudu s tolerančními mezemi  $\pm 1 \%$  tak, jak jsou používány i u vodoměrných vrtulí, je součástí grafů 7.13, 7.14 a 7.15.



Graf 7.13 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\omega$  v horizontální rovině pro MF Pro



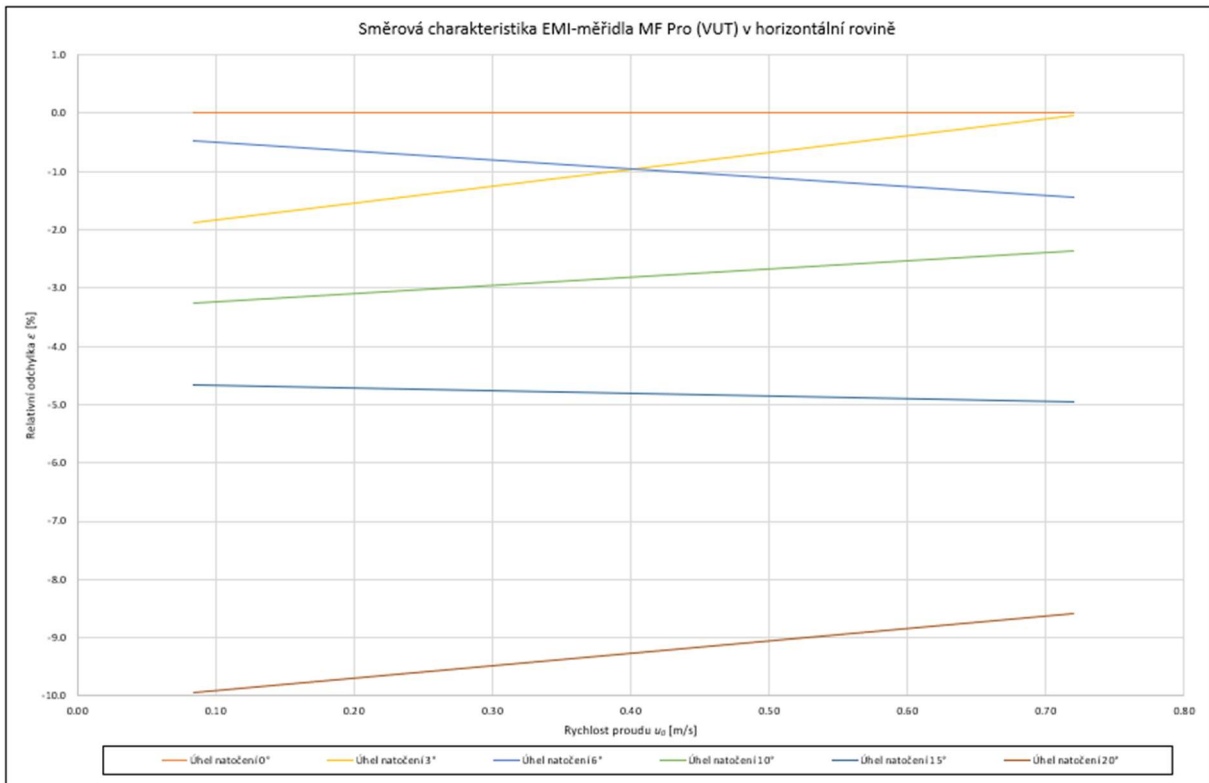
Graf 7.14 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\omega$  v horizontální rovině pro Flo-Mate 2000



Graf 7.15 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\omega$  v horizontální rovině pro Valeport-Cylindrical (plná čára) a Valeport-Flat (čárkovaná čára)

Ve všech třech grafech je pro porovnání vynesena shodná charakteristika směrové citlivosti stanovena při všech třech rychlostech a vrtule s propelerem č. 1 stanovena při rychlosti okolo 0,3 m/s. Je patrné, že všechna čtyři EMI-měřidla se od „ideálních“ komponentních vlastností vodoměrné vrtule výrazně odlišují. V případě měřidla MF Pro lze s velkou opatrností potvrdit tvrzení výrobce, že do úhlu odklonu  $10^\circ$  se měřidlo chová relativně očekávatelně ve smyslu funkce  $\cos \alpha$ . U měřidel Valeport-Cylindrical a Valeport-Flat lze taktéž tvrdit, že jsou komponentní vlastnosti v uvedených mezích potvrditelné, avšak u měřidla Flo-Mate 2000 jsou tyto vlastnosti v uvedených mezích potvrditelné pouze v řádu několika stupňů odklonu od směru natékajícího proudu. Měřidlo je prakticky bez komponentních vlastností.

V příloze P\_S\_1\_H, P\_S\_2\_H, P\_S\_3\_H a P\_S\_4\_H jsou uvedeny pro všechna měřidla směrové charakteristiky vyjádřené relativní odchylkou  $\varepsilon$  a relativní odchylky  $\varepsilon$  s jiným vyjádřením os grafu (příklad lze vidět na grafu 7.16), které lze použít pro případnou korekci měřených dat při znalosti příslušného úhlu odklonu snímače měřidla od směru natékajícího proudu. Ze závislosti je patrná jistá nesystematičnost trendů v okolí nízkých úhlů odklonu. Tato skutečnost se projevuje především v oblasti nízkých absolutních hodnot měřených rychlostí. Zde je třeba brát výsledky s rezervou.



Graf 7.16 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\varepsilon$  v transformované podobě v horizontální rovině pro MF Pro

Na grafech je velmi dobře patrné, že se zvyšujícím se úhlem odklonu snímače měřidla od směru natékajícího proudu dochází k poklesu hodnoty rychlosti vykazované měřidlem. Tento efekt lze charakterizovat jako systematický vliv na výsledek měření (vždy je měřena menší hodnota rychlosti) a nelze jej zahrnout jako jeden ze zdrojů případné nejistoty. Lze tak při známém úhlu odklonu provést pouze vhodnou korekci.

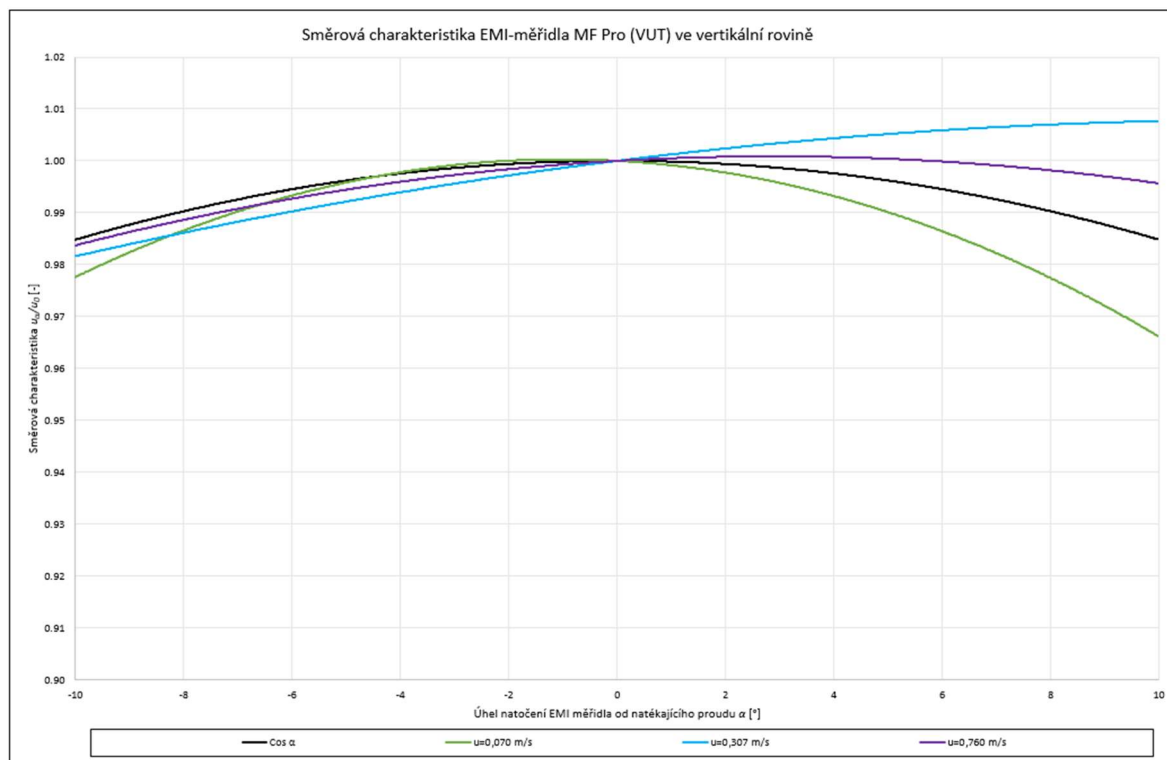
### 7.4.3 Vyhodnocení měření provedené ve vertikální rovině

Stejným způsobem, jako byly prezentovány směrové charakteristiky stanovené při odklonu snímače v horizontální rovině, představíme výsledky pro odklon v rovině vertikální, s tím rozdílem, že u horizontální roviny jsme posuzovali čtyři snímače a u vertikální roviny budeme vyhodnocovat výsledky pouze u EMI-měřidel typu MF Pro a Flo-Mate 2000.

Z prvních výsledků vyplynulo, že směrové charakteristiky nejsou pro převrácené úhly (stejně úhly s rozdílnými znaménky v jednotlivých kvadrantech) symetrické. Charakteristiky tak neodpovídají průběhu sudé funkce. Tato vlastnost může být způsobena vlivem připojeného datového kabelu shora snímače nebo specifickým obtékáním obou posuzovaných snímačů.

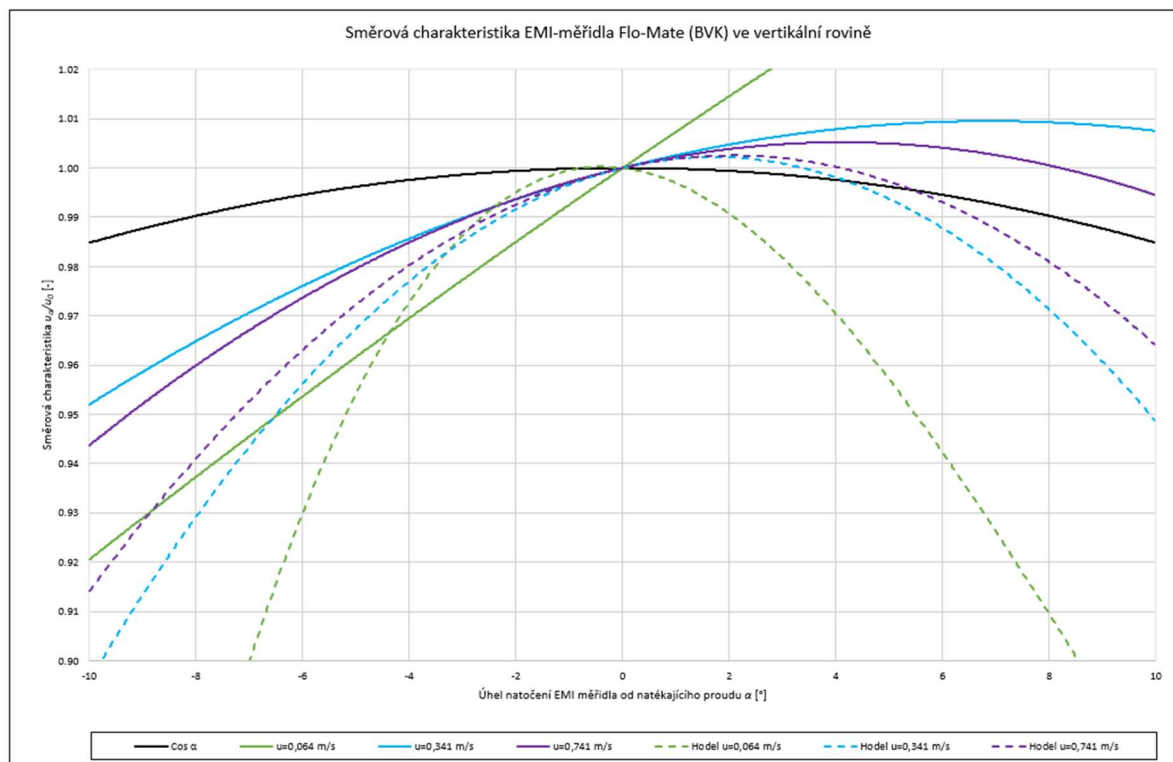
V uvedených grafech 7.17 a 7.18 jsou zobrazeny průběhy směrové charakteristiky vyhodnocené ve smyslu rovnice (4.20). Je tak možné provést porovnání s průběhem funkce

$\cos \alpha$ . Na první pohled je jasné, že charakteristika v rozsahu měřených rychlostí pro EMI-měřidlo MF Pro je výrazně blíže komponentní závislosti vystižené průběhem funkce  $\cos \alpha$ . Při pohybu dozadu (záporné úhly) lze charakteristiku hodnotit uspokojivě, při posunu dopředu (kladné úhly) je rozptyl dosažených výsledků kolem  $\cos \alpha$  výraznější.



Graf 7.17 Směrová charakteristika ve vertikální rovině pro MF Pro

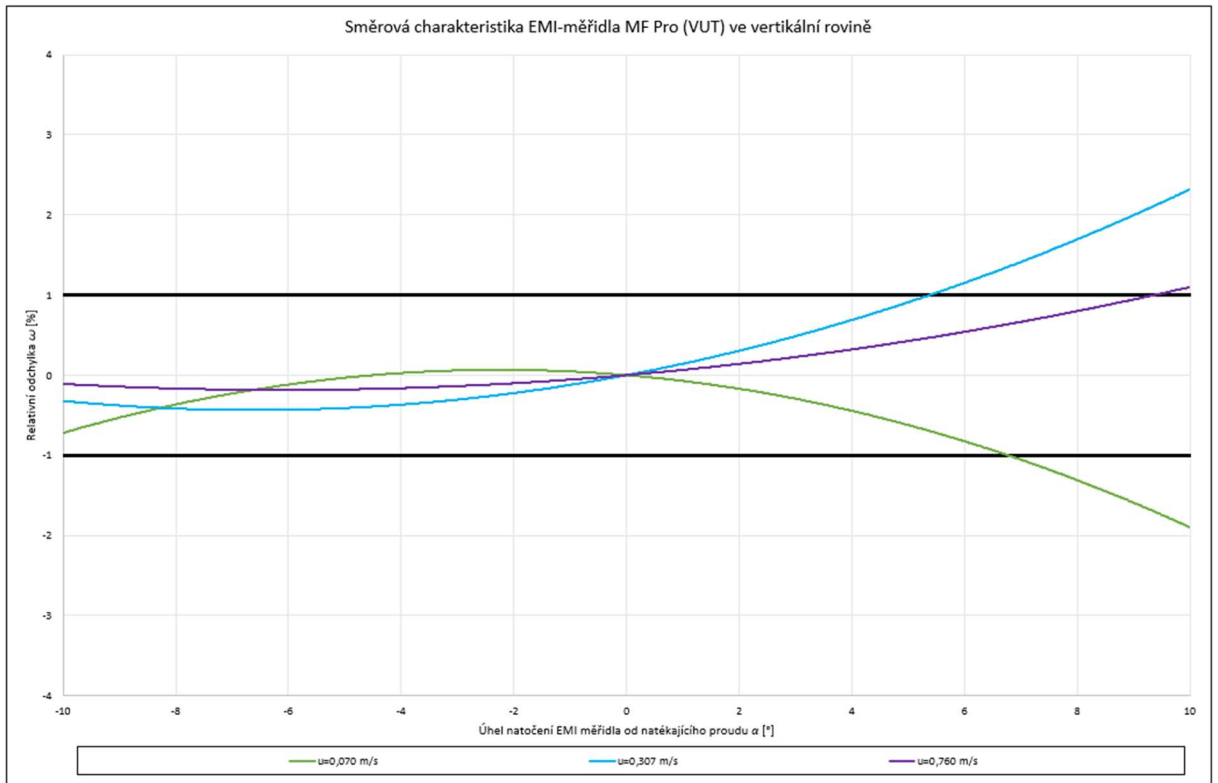
Obdobné chování, ale s daleko většími odchylkami od průběhu funkce  $\cos \alpha$  vykazuje EMI-měřidlo Flo-Mate 2000. Při záporných úhlech je měřena podstatně menší rychlost. Při úhlech kladných jsou registrovány i hodnoty, které publikoval v [13] Hodel. Z tohoto pohledu je námi prezentovaná charakteristika příznivější než ta, kterou v kalibrační laboratoři stanovil on. Výraznější neshoda mezi našimi a jeho daty je pak patrná za kladných úhlů. Hodel se svými daty více blíží průběhu sudé funkce.



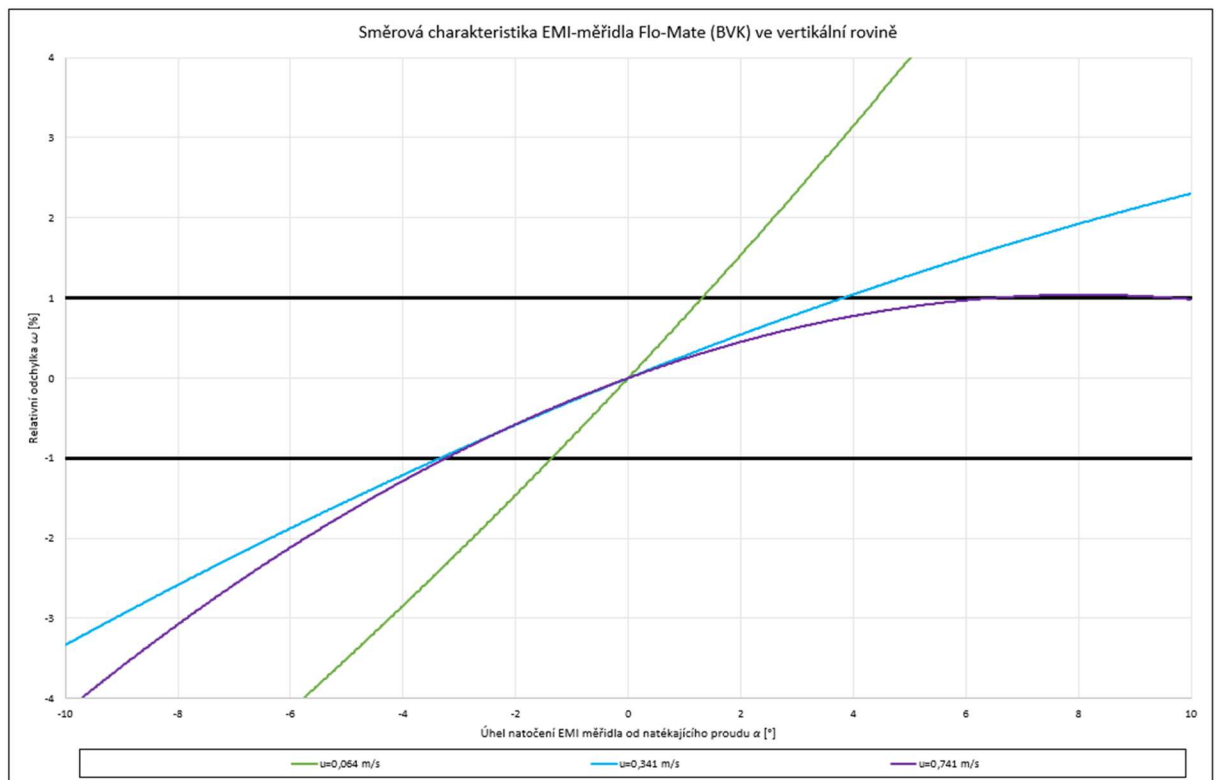
Graf 7.18 Směrová charakteristika ve vertikální rovině pro Flo-Mate 2000

Míra komponentnosti příslušných měřidel je opět nejlépe patrná z grafického vyjádření průběhu odchylky  $\omega$  tak, jak je uvedeno v grafech 7.19 a 7.20. Zatímco u měřidla MF Pro lze v rozsahu úhlů od  $-10^\circ$  do  $+6^\circ$  hovořit o jistém komponentním chování, u měřidla Flo-Mate 2000 s komponentními vlastnostmi počítat nelze. Měřidlo lze, stejně jako při měření v horizontální rovině, považovat za nekomponentní.

Ostatní grafické výstupy ve vertikální rovině směrové charakteristiky vystižené hodnotou relativní odchylky  $\varepsilon$  a relativní odchylky  $\varepsilon$  s jiným vyjádřením os grafu jsou stejně jako u horizontální roviny přiloženy v příloze této diplomové práce (P\_S\_1\_V a P\_S\_2\_V).



Graf. 7.19 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\omega$  ve vertikální rovině pro MF Pro



Graf 7.20 Směrová charakteristika vyjádřena odchylkou  $\omega$  ve vertikální rovině pro Flo-Mate 2000

## 8 ZÁVĚR

Diplomová práce je výsledkem bezmála ročního výzkumu, který probíhal v měrném žlabu Laboratoře vodohospodářského výzkumu Ústavu vodních staveb Fakulty stavební VUT v Brně. Práce byly prováděny se čtyřmi EMI-měřidly a jednou vodoměrnou vrtulí s propelerem č. 1. Z provedeného výzkumu lze vyvodit několik důležitých obecných skutečností.

Experimentální výzkum zabývající se vlivem turbulence proudu na měřenou rychlost a její nejistotu byl prováděn se dvěma EMI-měřidly (Flo-Mate 2000 a MF Pro) a jednou vodoměrnou vrtulí.

Ukázalo se, že nejistoty měřené bodové rychlosti proudu stanovené vodoměrnou vrtulí jsou prakticky shodné s daty, jež byly získány analýzou výsledků provedených s oběma EMI-měřidly. Vzájemné rozdíly nejistot měření mezi jednotlivými měřidly za středních turbulencí a vyšších rychlostí dosahují jen jednotek procent.

U druhé části experimentálního výzkumu se práce zabývala směrovou citlivostí měřidel bodových rychlostí a porovnávala mezi sebou 4 typy EMI-měřidel (Flo-Mate 2000, MF Pro, Valeport-Cylindrical a Valeport-Flat).

Ukázalo se, že u měřidel MF Pro, Valeport-Cylindrical a Valeport-Flat lze jejich směrovou charakteristiku v oblasti nízkých úhlů do  $\pm 10^\circ$  odklonu snímače měřidla od směru natékajícího proudu chápat jako komponentní. Tato vlastnost se u MF Pro prokázala jak v rovině horizontální, tak i v rovině vertikální, u zbylých dvou měřidel v rovině vertikální měření neproběhlo. V případě měřidla Flo-Mate 2000 nelze s komponentními vlastnostmi počítat.

Pro všechna zkoumaná měřidla platí, že korekci v případě šikmého proudění lze realizovat za pomoci námi získaných dat. Z výsledků uvedených v této práci vyplývá, že v případech, kdy je měření prováděno například v silně znečištěné vodě, a poloha snímače se nedá kontrolovat vizuálně, je třeba měřidlo umístit do „správného“ směru vůči natékajícímu proudu. Minimalizuje se tak vznik chyby měření rychlosti, která je v tomto případě prakticky vždy nižší než její předpokládaná hodnota. Z vyhodnocení výsledků v této práci vyplývá, že je třeba být při umísťování snímače měřidla do proudu velmi pečlivý. U měřidla Valeport-Cylindrical a Valeport-Flat doporučujeme maximální odchýlení  $\pm 5^\circ$ , u MF Pro  $\pm 4^\circ$  a u Flo-Mate 2000  $\pm 2^\circ$ . Odchýlení snímače měřidla ve vertikální rovině bychom se při měření, ať už „běžném“ nebo půdorysně „šikmém“, měli vyvarovat úplně.



## 9 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JANDORA, Jan a Jan ŠULC. *Hydraulika: modul 01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-512-9.
- [2] ČSN EN ISO 748. *Hydrometrie-Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [3] MP 010. *Metrologický předpis.: Úřední měření průtoku vody v profilech s volnou hladinou*. In: Brno: Český metrologický institut, 2018.
- [4] ČSN ISO 1088. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Metody rychlostního pole. Sběr a zpracování údajů pro určení chyb při měření*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [5] ŽOUŽELA, Michal. *Posouzení metod pro měření a vyhodnocení rychlostních polí reálných prizmatických tratí při definovaných poměrech s volnou hladinou*. Brno, 2005. Disertační práce. FAST VUT.
- [6] NĚMEČEK, Pavel. *Nejistoty měření*. Praha: Česká společnost pro jakost, o.s., 2008. ISBN 978-80-02-02089-9.
- [7] ČSN ISO 8363. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Obecné návody pro výběr metod*. Praha: Federální úřad pro normalizaci a měření, 1993.
- [8] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIN. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-156-X.
- [9] *White paper OTT MF Pro* [online]. 2015 [cit. 2020-12-05]. Dostupné z: <https://www.ott.com/de-de/produkte/download/white-paper-ott-mfpro/>
- [10] ŽOUŽELA, Michal, Pavel ZUBÍK a Jiří BŘEZINA. *Program rozvoje metrologie 2018: Posouzení použitelnosti měřidel bodové rychlosti proudu využívající elektromagnetického principu měření*. Brno, 2018.
- [11] ČSN ISO 2537. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem*. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [12] LICHTNEGER, Petr. *Verifikace nejistoty ve stanovení bodové rychlosti proudu*. Brno, 2002. Diplomová práce. FAST VUT.
- [13] HODEL, Hanspeter. *Vergleichsmessungen mit elektromagnetischen Geschwindigkeitssonden. 100 Jahre Eichstätte für hydrometrische Flügel. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft*. Bern 1996
- [14] ČSN 25 9312. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Metody rychlostního pole. Zjišťování celkové chyby*. Praha: Český normalizační institut, 1994.

[15] ŽOUŽELA, Michal, Pavel ZUBÍK a Martin VÍTŮ. *Program rozvoje metrologie 2020 Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. Výzkumná zpráva, LVV – FAST – VUT v Brně*, Brno, 2020.

[16] *Zákon č. 505/1990 Sb., o metrologii, ve znění pozdějších předpisů.*

[17] ŽOUŽELA, Michal, Pavel ZUBÍK, Jiří BŘEZINA a Martin VÍTŮ *Metrologické charakteristiky elektromagnetických měřidel bodové rychlosti vodního proudu*. *Metrologie*. 2020, 29(2/2020), 8 str.

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

### Seznam symbolů a označení

Popis	Označení	Jednotky
Autokorelační funkce s časovým krokem $k$	$\rho(k)$	[-]
Bodová rychlost proudu	$u$	[m/s]
Bodová rychlost proudu odkloněná od natékajícího proudu o úhel $\alpha$	$u_\alpha$	[m/s]
Bodová rychlost v laboratoři	$u_L$	[m/s]
Celočíselný násobitel integrační doby při prodloužení doby měření	$q$	[-]
Časově střední hodnota rychlosti	$\bar{u}$	[m/s]
Doba měření	$t$	[s]
Frekvence otáček	$n$	[Hz]
Funkce závisící na vzájemně nezávislých parametřích $X$	$Y$	[-]
Hloubka svislicového pásu	$h$	[m]
Hodnota měření parametru $X$	$x$	[-]
Intenzita turbulence	$T_u$	[-]
Koeficient kombinované nejistoty	$k_U$	[-]
Koeficient závislý na počtu opakování měření	$k_x$	[-]
Konduktivita – měrná vodivost	$\sigma$	[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ]
Konstanta měření $a$	$a$	[-]
Konstanta měření $b$	$b$	[-]
Konstanta vodoměrné vrtule $\alpha$	$\alpha$	[-]
Konstanta vodoměrné vrtule $\beta$	$\beta$	[-]
Měřený parametr (fyzikální veličina)	$X$	[-]
Odhadnutá hodnota funkce $Y$	$\tilde{y}$	[-]
Okamžitá rychlost pro eliminaci lineárního trendu	$u_i'$	[m/s]
Okamžitá naměřená rychlost v čase $t_i$	$u_i$	[m/s]
Parciální derivace funkce $Y$ podle parametru $X$	$\frac{\partial Y}{\partial X}$	[-]
Počet opakování	$n$	[-]
Počet svislicových pásů	$m$	[-]
Podélná složka bodové rychlosti proudu	$u_0$	[m/s]
Průměr trubice	$D$	[m]
Průměrná rychlost na svislici	$\bar{v}$	[m/s]
Průřezová rychlost	$v$	[m/s]
Průtočný průřez	$S$	[m <sup>2</sup> ]
Průtok	$Q$	[m <sup>3</sup> /s]
Průtok v laboratoři	$Q_L$	[l.s <sup>-1</sup> ]
Relativní nejistota funkce $Y$	$p_Y$	[-]
Relativní nejistota při stanovení bodové rychlosti v laboratoři	$p'_{Au}$	[-]
Relativní nejistota typu A při stanovení bodové rychlosti	$p_{Au}$	[-]

Relativní nejistota typu A při stanovení hloubky pásu	$p_{Ah}$	[-]
Relativní nejistota typu A při stanovení kalibrační konstanty	$p_{Ac}$	[-]
Relativní nejistota typu A při stanovení průměrné rychlosti	$p_{Av}$	[-]
Relativní nejistota typu A při stanovení šířky pásu	$p_{Ab}$	[-]
Relativní nejistota typu A ve stanovení průtoku	$p_{AQ}$	[-]
Relativní nejistota typu B při stanovení hloubky pásu	$p_{Bh}$	[-]
Relativní nejistota typu B při stanovení kalibrační konstanty	$p_{Bc}$	[-]
Relativní nejistota typu B při stanovení průřezové rychlosti	$p_{Bm}$	[-]
Relativní nejistota typu B při stanovení šířky pásu	$p_{Bb}$	[-]
Relativní nejistota typu B ve stanovení průtoku	$p_{BQ}$	[-]
Relativní odchylka bodové rychlosti proudu vykazované měřidlem od hodnoty funkce $\cos \alpha$ v závislosti na směru natékajícího proudu	$\omega$	[-]
Relativní odchylka bodové rychlosti proudu vykazované měřidlem v závislosti na směru natékajícího proudu	$\varepsilon$	[-]
Relativní rozšířená nejistota	$P_Q$	[-]
Relativní standartní kombinovaná nejistota	$p_Q$	[-]
Reynoldsovo kritérium	$Re$	[-]
Rozšířená standartní nejistota	$U_Y$	[-]
Složka rychlosti proudu odkloněná od natékajícího proudu o úhel $\alpha$	$v_\alpha$	[m/s]
Směrodatná odchylka bodové rychlosti proudu	$s_u$	[m/s]
Směrodatná odchylka bodové rychlosti proudu pro $q.t_0$	$s_{u,q,t_0}$	[m/s]
Směrodatná odchylka bodové rychlosti proudu pro $t_0$	$s_{u,t_0}$	[m/s]
Směrodatná odchylka parametru $X$	$s_X$	[-]
Standartní kombinovaná nejistota	$u_Y$	[-]
Standartní nejistota	$u$	[-]
Standartní nejistota typu A	$u_A$	[-]
Standartní nejistota typu A funkce Y	$u_{AY}$	[-]
Standartní nejistota typu B funkce Y	$u_{BY}$	[-]
Střední hodnota v celém časovém intervalu měření	$\bar{t}$	[s]
Šířka měřeného profilu	$B$	[m]
Šířka měřeného profilu při odklonu normály od směru natékajícího proudu o úhel $\alpha$	$B_\alpha$	[m]
Šířka svislicového pásu	$b$	[m]
Šířka měrného žlabu	$a$	[mm]
Teplota	$T$	[C°]
Tíhové zrychlení	$g$	[m/s <sup>2</sup> ]
Úhel odklonu měřidla vzhledem k natékajícímu proudu	$\alpha$	[°]
Viskozita kapaliny	$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]

## **Použité zkratky**

### **Popis**

Brněnské vodárny a kanalizace, a.s.

Česká státní norma

Elektromagnetické indukční měřidlo

Evropská norma

International organization for standardization

Kapitola

Maximální

Metrologický předpis

Obrázek

Spojené státy americké

Univerzální sériová sběrnice

Vysoké učení technické v Brně

### **Označení**

*BVK*

*ČSN*

*EMI-měřidlo*

*EN*

*ISO*

*kap.*

*max*

*MP*

*obr.*

*USA*

*USB*

*VUT*

## **11 SEZNAM PŘÍLOH**

**P\_T\_1** – Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti pro vodoměrnou vrtuli s propelerem č.1

**P\_T\_2** – Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti pro MF Pro

**P\_T\_3** – Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti pro Flo-Mate 2000

**P\_T\_S** – Vliv turbulence na hodnotu a přesnost měřené rychlosti pro všechna vybraná měřidla

**P\_S\_1\_H** – Směrová citlivost pro MF Pro v horizontální rovině

**P\_S\_1\_V** – Směrová citlivost pro MF Pro ve vertikální rovině

**P\_S\_2\_H** – Směrová citlivost pro Flo-Mate 2000 v horizontální rovině

**P\_S\_2\_V** – Směrová citlivost pro Flo-Mate 2000 ve vertikální rovině

**P\_S\_3\_H** – Směrová citlivost pro Valeport-Cylindrical v horizontální rovině

**P\_S\_4\_H** – Směrová citlivost pro Valeport-Flat v horizontální rovině