

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

1999

Andrea Bendová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií



DIPLOMOVÁ PRÁCE

***Téma:* VLIV HYDROMECHANICKÝCH PORUCH
NA PROVOZNÍ CEJCHOVÁNÍ INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚŘŮ**

***Theme:* INFLUENCE OF THE HYDROMECHANICAL ERRORS ON
OPERATIONAL CALIBRATION OF THE INDUCTIVE
FLOWMETERS**

1999

Andrea Bendová

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů

Školní rok: 1998/1999

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

pro **Andreu Bendovou**
obor **Textilní technologie**
zaměření **Řízení technologických procesů**

Vedoucí katedry Vám ve smyslu zákona č. 172/1990 Sb. o vysokých školách určuje tuto diplomovou práci:

Název tématu: **Vliv hydromechanických poruch na provozní cejchování indukčních průtokoměrů.**

Zásady pro vypracování :

1. Proved'te rozbor uplatnění indukčních průtokoměrů v textilním průmyslu.
2. Seznamte se základy hydromechaniky s ohledem na měření průtoku.
3. Provéřte možnosti vzniku hydromechanických poruch a simulujte je na provozní cejchovací stolici.
4. Navrhněte metodický postup minimalizace hydromechanických poruch.
5. Konkrétní závěry zpracujte přehledně dle zásad tvorby technické dokumentace do samostatné kapitoly.

185/99T

KEL/RTP
53 s., 14 s. příl.

ANOTACE

Diplomant: Andrea Bendová

Téma: Vliv hydromechanických poruch na provozní cejchování
indukčních průtokoměrů

Diplomová práce se zabývá základy hydromechaniky s ohledem na měření průtoku, popisuje hydromechanické poruchy uvnitř potrubí a zásady správné instalace indukčních průtokoměrů v provozu. Úkolem praktické části je simulace vzniku hydromechanických poruch a návrh postupu jejich minimalizace.

ANNOTATION

Work out: Andrea Bendová

Theme: Influence of the hydromechanical errors on operational
calibration of the inductive flowmeters

The thesis theme is hydromechanic basics regarding to the flow rate measure. Describes the hydromechanical defects inside the pipeline and the principles of a correct instalation inductive flowmeters in operation. Assignment of the practical part is an appearance simulation of a hydromechanical errors and progress suggestion to minimize them.

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií

Obor: 31-26-8

Katedra elektrotechniky a elektromechanických systémů

***Téma:* VLIV HYDROMECHANICKÝCH PORUCH NA PROVOZNÍ CEJCHOVÁNÍ INDUKČNÍCH PRŮTOKOMĚŘŮ**

Andrea Bendová

Vedoucí diplomové práce: Ing. Aleš Richter, CSc.

Konzultant: Ing. Radek Lachman, EESA s.r.o.

Rozsah práce:

Počet stran: 53

Počet obrázků: 51

Počet tabulek: 6

Počet grafů: 1

Počet příloh: 5

Prohlášení k vypracování a obhajobě diplomové práce

Já, níže uvedená osoba, se zavazuji, že diplomovou práci

vypracuji samostatně, a že diplomovou práci

vypracuji s použitím uvedené literatury.

Jsem si vědoma, že pokud bych se dopustila

oprávněného porušení, bude moje práce

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury.

.....Andrea Bendová.....

V Liberci dne 28. 5. 1999

Andrea Bendová

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce:

Jsem si vědoma toho, že diplomová práce je majetkem školy a že s ní nemohu sama bez svolení školy disponovat, a že diplomová práce může být zapůjčena či objednána (kopie) za účelem využití jejího obsahu.

Beru na vědomí, že po pěti letech si mohu diplomovou práci vyžádat v univerzitní knihovně Technické univerzity v Liberci, kde je uložena.

Andrea Bendu

Obsah

Přehled použitých symbolů a značek	9
1. Úvod	11
1.1. Uplatnění indukčních průtokoměrů v textilním průmyslu	11
2. Teoretický rozbor funkce indukčních průtokoměrů	13
2.1. Princip funkce indukčních průtokoměrů	13
2.2. Konstrukce indukčních průtokoměrů	15
3. Teoretické základy hydromechaniky z hlediska měření průtoku	16
3.1. Rovnice kontinuity	16
3.2. Dynamika ideální kapaliny	17
3.2.1. Bernoulliho rovnice	17
3.2.2. Hydrodynamické paradoxon	18
3.3. Dynamika reálné kapaliny	22
3.3.1. Vnitřní tření kapalin	22
3.3.2. Druhy proudění reálné kapaliny, tlaková ztráta	23
4. Posouzení vlivu vybraných hydromechanických poruch při měření indukčními průtokoměry	25
4.1. Stanovení základních podmínek	25
4.2. Princip cejchování indukčních průtokoměrů	25
4.3. Parametry clon použitých pro simulaci deformací proudění	26
4.4. Provádění experimentu	28
4.4.1. Měření na školní lince	28
4.4.1.1. Přehled výsledků a závěry vyplývající z měření na školní lince	30
4.4.2. Měření na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o.	33
4.4.2.1. Přehled výsledků a závěry vyplývající z měření získaného na cejchovací lince	34
5. Vliv charakteru proudění kapaliny na činnost indukčních průtokoměrů	35
5.1. Mechanika tekutin, rychlostní profil	35
5.2. Příčiny vzniku chyb při měření průtoku indukčním průtokoměrem	36
5.3. Vliv nerovnoměrného rychlostního profilu na indukční měření průtoku	41
5.4. Měření průtoku pomocí škrcení toku	42
6. Bezprostředně vyplývající doporučení z provedeného měření	43
7. Porovnání základních technických parametrů indukčních průtokoměrů vyráběných společností EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou	49
8. Závěr	52
Literatura	53

Přehled použitých symbolů a značek

B	magnetická indukce	[Vs.m ⁻²], [T]
B_s	střední hodnota magnetické indukce v ose průtokoměru	[Vs.m ⁻²], [T]
b	atmosférický tlak	[Pa]
d	průměr potrubí	[mm]
DN	světlost průtokoměru udávaná výrobcem	[mm]
E	mechanická energie	[J]
E	intenzita elektrického pole	[V.m ⁻¹]
E	chyba průtokoměru	[%]
F	síla	[N]
f_e	naměřená frekvence etalonu	[s ⁻¹]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
h	skutečná výška	[m]
k	konstanta etalonu	[m ³]
K_p	konstanta průtokoměru	[imp.dm ⁻³]
l	vzdálenost elektrod v dutině průtokoměru	[mm]
M	magnetizace	[A.m ⁻¹]
m	hmotnost kapaliny	[kg]
N	počet měření	[-]
n	celkový počet závitů budících cívek	[-]
P	elektrická polarizace kapaliny v magnetoel. průtokoměru	[As.m ⁻²], [C.m ⁻²]
p	tlak	[Pa]
Q_m	hmotnostní průtok	[kg s ⁻¹]
Q_v	objemový průtok	[m ³ s ⁻¹], [m ³ h ⁻¹], [l.min ⁻¹]
$\overline{Q}_v$	střední hodnota objemového průtoku	[m ³ s ⁻¹], [m ³ h ⁻¹], [l.min ⁻¹]
q_v	elementární objemový průtok	[m ³ s ⁻¹], [m ³ h ⁻¹], [l.min ⁻¹]
R	vnitřní průměr čidla	[mm]
R_{ik}	stejnoseměrný odpor na měřicích elektrodách elektromagnet. průtokoměru	[kΩ]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re_k	kritické Reynoldsovo číslo	[-]
S	průřez trubice	[m ²]
t	čas	[s]
u	napětí na měřicích elektrodách elektromagnet. průtokoměru	[V]
u_{Ch}	napětí na elektrodách elektromagnet. průtokoměru způsobené elektrochemickými vlivy	[V]
u_p	napětí na elektrodách elektromagnet. průtokoměru vyvolané pohybem kapaliny	[V]
u_T	napětí na elektrodách elektromagnet. průtokoměru vyvolané transformací proměnného budícího magnetického pole	[V]
V	objem kapaliny	[m ³]
V	maximální lokální rychlost proudící kapaliny v dutině průtokoměru	[m.s ⁻¹]
v	rychlost	[m.s ⁻¹]
$\bar{v}$	průměrná rychlost kapaliny v potrubí	[m.s ⁻¹]

$\bar{v}_k$	kritická rychlost	_____	[m.s ⁻¹]
W	práce	_____	[J]
x	vzdálenost	_____	[m]
y	vzdálenost	_____	[m]
γ	relativní drsnost povrchu	_____	[-]
α	úhel rozšíření difuzoru	_____	[°]
Δ	absolutní hodnota rozdílu středních hodnot objemového průtoku etalonu a průtokoměru	_____	[m ³ s ⁻¹], [m ³ h ⁻¹], [l.min ⁻¹]
η	dynamická viskozita	_____	[Pa.s]
ν	kinematická viskozita	_____	[m ² .s ⁻¹]
ξ	ztrátový součinitel	_____	[-]
ρ	hustota proudící kapaliny	_____	[kg.m ⁻³]
τ	tečné napětí	_____	[Pa]
ϕ	magnetický indukční tok	_____	[Vs], [Wb]

1.1. Uplnění indukčních průtokoměrů v tekutině

Indukční průtokoměry se používají v průmyslu tam, kde je potřeba měřit průtok kapaliny. Díky jednoduché konstrukci měří tlakovou ztrátu způsobenou průtokem kapaliny v trubce. Vzhledem k tomu, že indukční průtokoměry jsou velmi přesné a mají dlouhou životnost, jsou vhodné pro měření průtoku kapaliny a také pro měření průtoku plynu. Vzhledem k tomu, že indukční průtokoměry jsou velmi přesné a mají dlouhou životnost, jsou vhodné pro měření průtoku kapaliny a také pro měření průtoku plynu.

Indukční průtokoměry jsou velmi přesné a mají dlouhou životnost, jsou vhodné pro měření průtoku kapaliny a také pro měření průtoku plynu. Vzhledem k tomu, že indukční průtokoměry jsou velmi přesné a mají dlouhou životnost, jsou vhodné pro měření průtoku kapaliny a také pro měření průtoku plynu.

1. Úvod

V současné době se měřením průtoku kapalin pomocí indukčních průtokoměrů zabývá více světových firem, protože průtokoměry kapalin založené na tomto principu poskytují jednoduchou mechanickou konstrukci při velmi dobré přesnosti měření. Přestože je tento princip měření značně komerčně využíván, je málo dostupných pramenů, které by se komplexně zabývaly touto problematikou. Je to způsobeno snahou o utajení veškeré teoretické a technické informace z důvodu ochrany průmyslového tajemství.

V České republice byla v minulosti silná výrobní a vývojová základna zabývající se výrobou, vývojem a aplikacemi indukčních průtokoměrů, ale vstupem zahraničních partnerů byl potlačen vývoj a zůstala zachována pouze licenční výroba. Je potěšitelné, že na druhé straně vznikají nové menší společnosti, které jsou schopny v této oblasti konkurovat zahraničním gigantům, třebaže nemají tak dlouhou vývojovou a výrobní tradici.

Tato práce byla zadána společností EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou na základě praktických zkušeností. Zabývá se vlivem hydromechanických poruch na přesnost cejchování indukčních průtokoměrů. Dnes nachází průtokoměry uplatnění v mnoha oblastech, proto je důležité uvědomit si, jaké následky mohou vyplynout z nesprávné instalace. Odběratel by měl dobře zvážit, co mu způsobí větší finanční ztráty. Zda zastavení výroby a z toho plynoucí ušlý zisk v této době nebo následné nesprávné výsledky při měření čidlem a ztráty způsobené touto chybou, které mohou být dlouhodobější a mnohdy i finančně náročnější. Je pravda, že u některých odběratelů není možné dodržet podmínky správné instalace, které spočívají v nedostatku místa v oblastech vhodných pro umístění čidla, anebo nemožnost umístit průtokoměr do správného bodu z důvodů spojených se špatnou přístupností daného místa. Zákazníci mnohdy mají své představy o bezpečně správném místě a ani si neuvědomují, jaké to může mít následky při vlastním měření. Tato diplomová práce je věnována nejen společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou, ale také všem uživatelům indukčních průtokoměrů, nejen jako doporučení správné instalace, ale i jako varování před nedodržením těchto zásad a následků s tím spojených.

1.1. Uplatnění indukčních průtokoměrů v textilním průmyslu

Indukční průtokoměry se používají v průmyslu tam, kde je potřeba měřit a regulovat průtoky kapalin. Díky jednoduché konstrukci měřicí trubice, jejíž měřicí profil je hladký, nejčastěji kruhový, bez vnitřních mechanických dílů, jsou indukční průtokoměry schopny měřit kapaliny a tekuté směsi s vysokou abrazivností. Vnitřní profil průtokoměru může být konstruován z materiálů s vysokou chemickou odolností, proto se velmi často používají k měření průtoku chemicky silně agresivních kapalin, kde jiné principy selhávají. Těmito vlastnostmi jsou indukční průtokoměry přímo předurčeny k použití v textilním průmyslu, kde jsou tyto látky hojně používány.

Indukční průtokoměry mohou být součástí různých dávkovacích automatů, kde je možné pomocí nich stanovovat objemová množství (objemové počítadlo). V úpravářenských a zušlechťovacích provozech mohou být použity u dávkovačů barviva do barvicí lázně pro namíchání požadovaného odstínu, u pracích procesů při dávkování potřebných komponent pro práci lázeň, jako jsou detergenty, avivážní prostředky, ustalovače a různé další chemikálie potřebné pro praní. Nebo při tvorbě pěny a zpěněných poživ, které se používají jak pro barvení, tak i jako substance pro tvorbu netkaných textilií. Pěna nebo zpěněné pojivo je vytvářena v určitém poměru ze vzduchu a z pojiva, které je

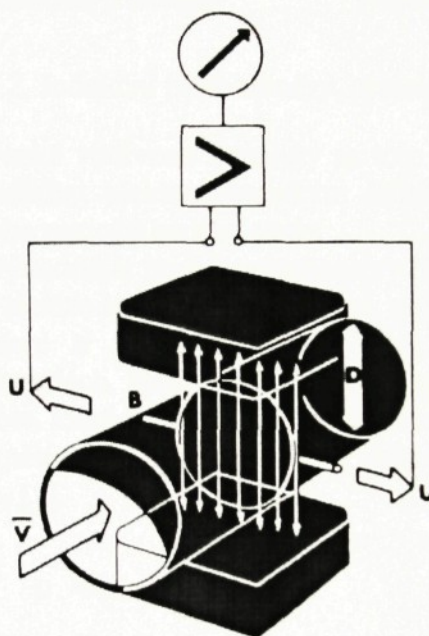
nejčastěji ve formě disperze. Indukční průtokoměr lze použít pro dávkování pojiva do zpěňovacího zařízení. Tedy na většině míst, kde se textilie perou nebo upravují.

TEORETICKÁ ČÁST

2. Teoretický rozbor funkce indukčních průtokoměrů

2.1. Princip funkce indukčních průtokoměrů

Indukční průtokoměry pracují na principu Faradayova indukčního zákona, který udává velikost elektrického napětí, vzniklého ve vodičích elektromagnetickou indukcí, jsou-li vodiče v časově proměnném elektromagnetickém poli nebo pohybují-li se v něm v příčném směru. Z principiálního hlediska funkce indukčního průtokoměru nás zajímá právě tato druhá část indukčního zákona. Při kolmém pohybu vodiče (v našem případě vodivého média) v magnetickém poli se v daném prostoru indukuje elektrické pole o intenzitě úměrné vektorovému součinu magnetické indukce a rychlosti pohybu (proudění). Fyzikálním projevem tohoto pole je vznik elektromotorické síly, působící na elektrické částice vodivého média a reprezentované vznikem tzv. Faradayova signálního napětí na elektrodách, umístěných kolmo k magnetickému poli i ke směru pohybu média (obr.2.1).



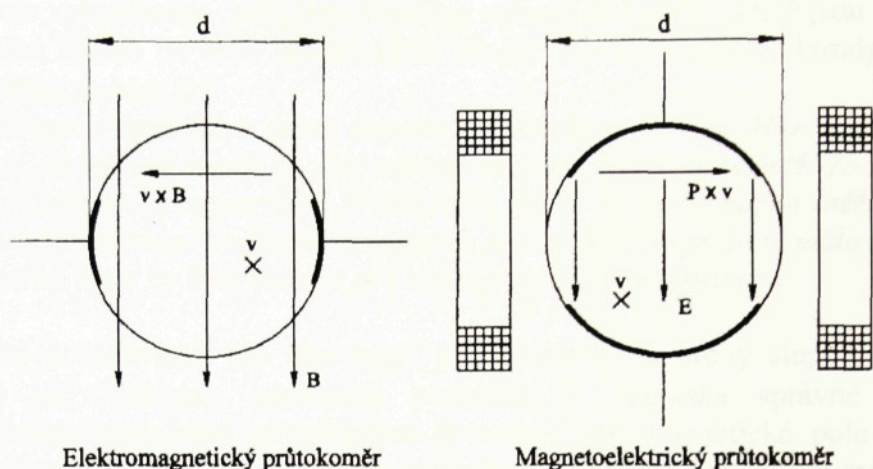
Obr.2.1. Faradayův zákon

Elektromagnetický průtokoměr - měřená kapalina protéká pouze magnetickým polem (v praktické realizaci uvažujeme pouze dva případy, kdy měřená kapalina protéká převážně magnetickým polem nebo elektrickým, ale nikdy neuvažujeme současný vliv obou budících polí) [1], proto můžeme teoreticky popsat funkci elektromagnetického indukčního průtokoměru (obr.2.2) zjednodušeným výrazem

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.1)$$

$\mathbf{E}$ zde značí intenzitu elektrického pole z hlediska klidové kapaliny, $\mathbf{v}$ představuje rychlost kapaliny protékající tělesem průtokoměru a $\mathbf{B}$ je indukcí magnetického pole. Podle těchto předpokladů (2.1) je možné buzení elektromagnetického průtokoměru stacionárním magnetickým polem. Při odvození výsledného napětí na elektrodách můžeme vyjít ze vztahu (2.2). V našem případě je možné integrovat po přímce [1], která tvoří spojnici mezi elektrodami.

$$u = u_p + u_{Ch} = \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) d\mathbf{l} + u_{Ch} \quad (2.2)$$



Obr.2.2. Indukční průtokoměry, princip funkce

Kvůli požadavku vysoké vodivosti kapaliny se toto provedení v praxi nepoužívá. Měřená kapalina nesmí podléhat elektrochemickým účinkům, bohužel tuto podmínku nesplňuje většina kapalin nebo roztoků na bázi vody.

V praxi je proto nejvýhodnější použít průtokoměry buzené střídavým magnetickým polem. Měřený signál na elektrodách se potom lépe určuje, protože je možné snáze odstranit stejnosměrné rušení a elektrochemické vlivy. Nevýhodou je indukování transformační složky na elektrodách, která vzniká časovou změnou budícího magnetického toku. Výsledné elektrické pole, které se projeví jako napětí na elektrodách, je součet napětí transformačního u_T , napětí od pohybující se kapaliny u_P a napětí vzniklé elektrochemickými vlivy u_{Ch} [1].

$$u = u_T + u_P + u_{Ch} \quad (2.3)$$

V praktickém odhadu velikosti napětí pohybové složky můžeme předpokládat kruhový průřez měřicí trubice s homogenním magnetickým polem v celém průřezu. Dalším důležitým předpokladem je laminarita proudění, to znamená, že vektor rychlosti $\mathbf{v}$ je konstantní v celém průřezu. Největší účinnost čidla je v případě, když vektor magnetického toku Φ ($\mathbf{B}$) je kolmý k rovině tvořené vektorem $\mathbf{v}$ a spojnici vrcholu elektrod [1]. Pro budící harmonické pole platí potom následující vztah:

$$u_P \cong \mathbf{B}_s \cdot d \cdot \mathbf{v} \quad (2.4)$$

Těchto předpokladů se dosahuje jen velice obtížně, protože naměřený signál na elektrodách je malý (maximálně 20% teoretického výsledku) a nabývá hodnot několika milivoltů při plném průtoku.

Magnetoelektrický průtokoměr - stejně jako v předchozím případě uvažujeme pro praktickou realizaci, že měřená kapalina protéká pouze elektrickým polem. Pro tento případ můžeme vyjádřit funkci magnetoelektrického průtokoměru následující rovnicí

$$\mathbf{M} = \mathbf{v} \times \mathbf{P} \quad (2.6)$$

Analogicky tu $\mathbf{M}$ značí magnetizaci a $\mathbf{P}$ magnetickou polarizaci kapaliny pro

magnetoelektrický průtokoměr [1].

Schéma magnetoelektrického průtokoměru je znázorněno na (obr.2.2). Změny magnetického pole vytvořeného pohybem kapaliny snímají dvě cívky, které jsou umístěny v ose průtokoměru kolmo na směr elektrických siločar. Plošné budící elektrody jsou na vnějším plášti měřicí trubice [1].

Poznámka: Tento typ průtokoměru nemá doposud praktické uplatnění. Hlavní nevýhodou tohoto principu je, že měřený signál je silně závislý na materiálové konstantě. To znamená, že není možné zkonstruovat univerzální průtokoměr, který by byl schopen měřit několik druhů kapalin. Dalším neméně podstatným záporem je i ta skutečnost, že je málo technicky významných kapalin, které by byly vhodné pro tento princip měření průtoku.

Základním požadavkem pro oba typy průtokoměrů je určitý stupeň vodivosti kapaliny (větší jak $5\mu\text{S}/\text{cm}$), laminarita proudění. Z hlediska správné činnosti elektromagnetického indukčního průtokoměru je nutné, aby magnetické pole v dutině průtokoměru bylo maximální a pokud možno homogenní (dosažení maximální magnetické indukce na spojenci mezi elektrodami).

2.2.Konstrukce indukčních průtokoměrů

Všechny vyráběné indukční průtokoměry jsou kruhového měřicího průřezu. Nejdůležitější částí průtokoměru je měřicí trubice, na kterou jsou kladeny následující požadavky:

Z hlediska elektrických parametrů je požadováno, aby byla nemagnetická a vnitřní stěna měla dostatečně dobré izolační vlastnosti. Zároveň musí odolávat vysokým hydraulickým tlakům (případně vysokým teplotám) a nesmí podléhat chemickým vlivům [1].

U průtokoměrů pro běžné praktické aplikace se nejčastěji používá nerezová nemagnetická ocel a vnitřní stěna se potahuje výstelkou z tvrdé gumy, polypropylenu nebo teflonu (PTFE). Vnitřní stěna se speciálně mechanicky upravuje na požadovanou drsnost, aby se minimalizoval vliv nehomogenity proudění.

Pro vysoké teploty (do 150°C) a agresivní prostředí se používá korundová keramická měřicí trubice (Al_2O_3). Nevýhodou tohoto materiálu je špatná obrobitelnost a náročné technologické zpracování. Proto jsou průtokoměry s keramickým tělesem výrazně dražší.

Další důležitou součástí průtokoměrů jsou měřicí elektrody. Tyto elektrody mají zajišťovat vodivý kontakt s měřenou kapalinou a zároveň musí být dostatečně chemicky odolné. Přechodový odpor výrazným způsobem snižuje chybu měření. Elektrody musí být zapuštěny do vnitřní stěny trubice tak, aby měly minimální vliv na rychlostní profil. V jejich okolí nesmí docházet k vířivému proudění. Dále je nutné, aby byly nemagnetické. U běžných průtokoměrů jsou elektrody vyrobeny z nerez oceli. Ve zvláštních případech se používá platina nebo titan [1].

Ostatní konstrukční díly průtokoměru jsou vyráběny z běžné konstrukční oceli. Zejména těsnicí příruby jsou vyráběny z feromagnetické oceli. Zde je nutné zajistit dostatečnou vzdálenost od magnetického obvodu tak, aby nedocházelo k vychylování budícího magnetického pole. Tytéž požadavky platí i pro umístění vrchního krycího pláště.

Důležitou součástí indukčních průtokoměrů jsou zemnící kroužky, které se vkládají na obě strany mezi upevňovací příruby. Vnitřní průměr je totožný s vnitřní světlostí měřicího profilu. Jsou vyrobeny z kvalitní oceli. Zemnící kroužky jsou spojeny s kostrou přístroje a slouží ke svedení rušivých napětí [1].

3. Teoretické základy hydromechaniky z hlediska měření průtoku

3.1. Rovnice kontinuity

Platí pro ustálené proudění danou proudovou trubicí (obr.3.1). Hmotnost tekutiny se ve vyznačeném objemu při ustáleném proudění nemění, a proto musí platit, že *hmotnost tekutiny vteklé za určitý časový interval do části trubice se musí rovnat hmotnosti tekutiny za stejnou dobu z ní vyteklé*, tj. $m_1 = m_2$, kde m_1 a m_2 jsou hmotnosti kapaliny proteklé průřezy S_1 a S_2 za dobu Δt : $m_1 = \rho_1 \cdot v_1 \cdot S_1 \cdot \Delta t$ a $m_2 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot S_2 \cdot \Delta t$, odkud

$$\rho_1 v_1 S_1 = \rho_2 v_2 S_2, \quad \rho \cdot S \cdot v = \text{konst.} \quad (3.1)$$

pro danou proudovou trubicí [4]. Pokud se jedná o nestlačitelnou kapalinu, $\rho = \text{konst.}$, dostaneme

$$\begin{aligned} S_1 v_1 &= S_2 v_2 \\ \text{tj.} \quad S \cdot v &= \text{konst.} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Hmotnostní průtok Q_m - hmotnost tekutiny proteklé průřezem dané trubice za jednotku času

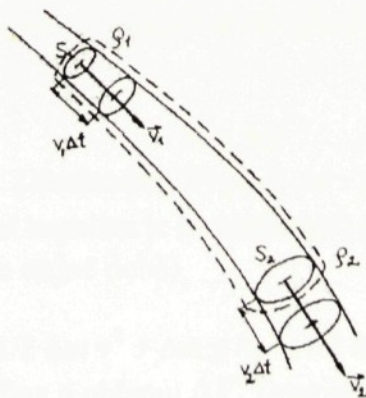
$$Q_m = \rho S v \quad (3.3)$$

Objemový průtok Q_v - objem tekutiny proteklé průřezem dané trubice za jednotku času

$$Q_v = S v \quad (3.4)$$

Rovnici kontinuity můžeme také psát ve tvaru

$$Q_m = \text{konst.} \text{ resp. } Q_v = \text{konst.} \quad (\text{když } \rho = \text{konst.}) \quad (3.5)$$

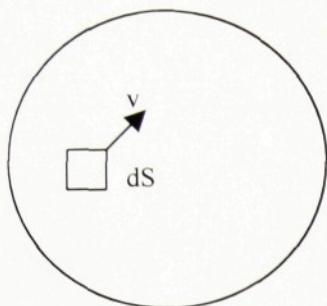


Obr.3.1 Rovnice kontinuity

Upozornění: Rychlost $\mathbf{v}$ nemusí být v celém průřezu stejná, pak počítáme se střední rychlostí průřezu

$$\overline{\mathbf{v}} = \frac{1}{S} \iint_{(s)} \mathbf{v} dS \quad (3.6)$$

[4]



Z hlediska uživatele průtokoměrů není nutné znát střední rychlost, ale celkové objemové množství. To spočteme z následujících rovnic:
Pro malé množství platí rovnice

$$q_v = \mathbf{v} dS$$

Celkové objemové množství získáme integrací předchozí rovnice:

$$Q_v = \iint_{(s)} \mathbf{v} dS$$

3.2. Dynamika ideální kapaliny

3.2.1. Bernoulliho rovnice

V případě ustáleného proudění ideální kapaliny platí pro proudění v dané proudové trubici *Bernoulliho rovnice*, která vyjadřuje *zákon zachování energie pro proudící kapalinu*. Lze ji odvodit tak, že pro kapalinu v dané části proudové trubice musí platit, že práce W všech sil na kapalinu působících musí být rovna přírůstku její mechanické energie ΔE , tj.

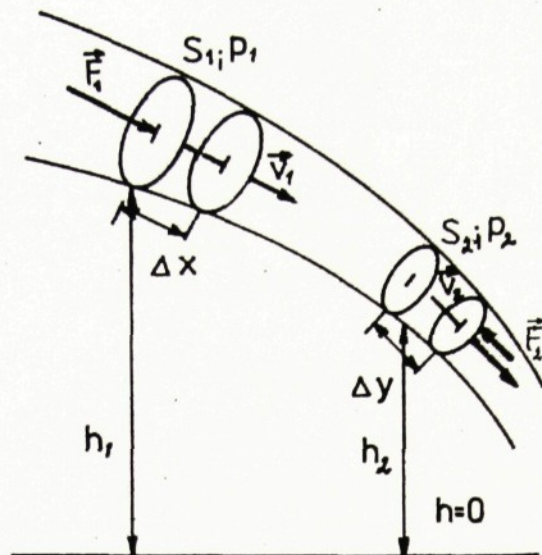
$$W = \Delta E$$

Pro W podle obr.3.2 dostaneme $W = p_1 S_1 \Delta x - p_2 S_2 \Delta y = (p_1 - p_2) \Delta V$, neboť $S_1 \Delta x = S_2 \Delta y = \Delta V$ (ideální kapalina je nestlačitelná) a pro ΔE dostaneme (W i ΔE tj. i Δx ; Δy ; ΔV ; Δm vztahujeme ke stejné době)

$$\Delta E = 1/2 \Delta m \mathbf{v}^2 + \Delta m g h_2 - (1/2 \Delta m \mathbf{v}_1^2 + \Delta m g h_1),$$

kde Δm je hmotnost kapaliny o objemu ΔV . Dosazením rovnice $W = \Delta E$ dostaneme

$$(p_1 - p_2) \Delta V = 1/2 \Delta m \mathbf{v}_2^2 + \Delta m g h_2 - (1/2 \Delta m \mathbf{v}_1^2 + \Delta m g h_1)$$



Obr.3.2 Bernoulliho rovnice

Vydělením ΔV a úpravou získáme Bernoulliho rovnici [4]

$$1/2 \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = 1/2 \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2 \quad (3.7)$$

tj.

$$1/2 \rho v^2 + \rho g h + p = \text{konst.} \quad (3.8)$$

po celé proudové trubici [4].

V této rovnici má každý člen význam energie jednotky objemové proudící kapaliny. ($1/2 \rho v^2$ - kinetická energie objemové jednotky, $\rho g h$ - potenciální energie objemové jednotky, p - tlak, má význam tlakové energie objemové jednotky). [4]

3.2.2. Hydrodynamické paradoxon

Z Bernoulliho rovnice plyne, že *tlak v zúženém místě potrubí se v důsledku zvětšení rychlosti v zúženém místě zmenší (hydrodynamické paradoxon)*! [4] Což využíváme i při měření indukčními průtokoměry, to znamená, že zvýšením rychlosti pomocí zúžení se zvětší citlivost čidla.

Neboť (pokud $S_2 < S_1$, z rovnice kontinuity $S_1 v_1 = S_2 v_2 \Rightarrow v_2 > v_1 \Rightarrow v_2^2 - v_1^2 > 0$).

Z Bernoulliho rovnice plyne

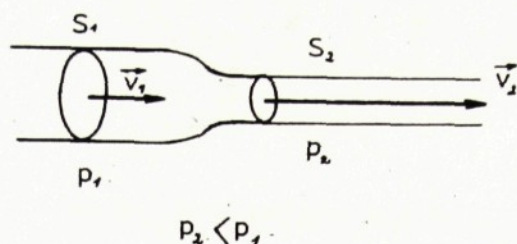
$$p_2 = p_1 - \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) < p_1$$

Pomocí poklesu tlaku lze měřit rychlost proudící kapaliny v potrubí (Venturiho trubice), neboť (viz. obr.3.3) $v_2 = (v_1 S_1) / S_2$ a z Bernoulliho rovnice plyne (když označíme $p_1 = p_2 = \Delta p$, $S_1 / S_2 = m$)

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_1^2 (m^2 - 1)$$

a odtud

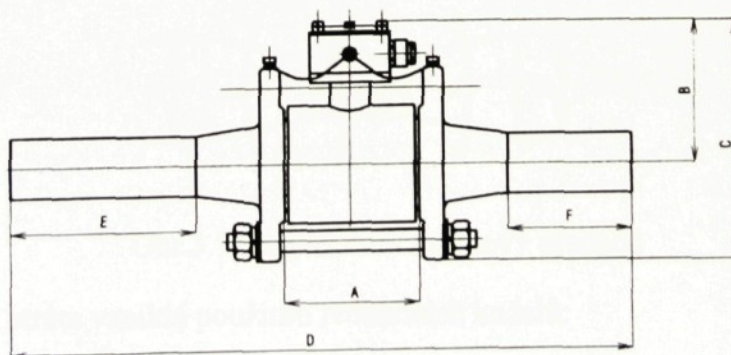
$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho (m^2 - 1)}}$$



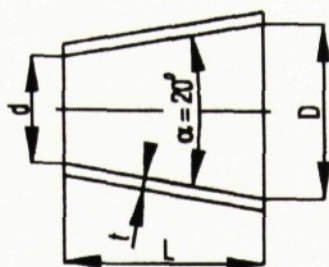
Obr.3.3. Hydrodynamické paradoxon

V běžné praxi není možné realizovat takovýto tvar (obr.3.3), proto se u průtokoměrů používá zapojení podle obr.3.4, kde pro přechod na menší DN lze použít kuželové konfuzory a difuzory s vrcholovým úhlem maximálně 20°, což bylo stanoveno empiricky tak, aby se zamezilo vzniku vírů. Nejmenší tlakové ztráty jsou při vrcholovém úhlu 8°, ale kužele pak vycházejí příliš dlouhé. Výrobce dodává univerzální kuželové přechody podle obr.3.7. Kužele se skládají ze dvou polovin, které se po případném zkrácení podélně svaří[2].

DN	10	20	40	80	150
A	66	82	100	163	190
B	95	95	102	127	164
C	147	147	177	227	310
D	170	266	515	920	1628
E	-	60	200	400	750
F	-	60	120	250	450



Obr. 3.4. Zapojení průtokoměru v praxi (příklad zapojení průtokoměru MT200)



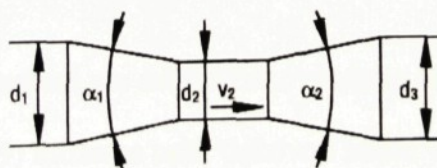
Obr.3.5. Tvar redukčního kužele

Průtokoměry jsou vyráběny v těchto typických jmenovitých světlostech DN:

- společnost EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou vyrábí průtokoměry následujících jmenovitých světlostí: 10; 20; 40; 80; 150 a 300 DN [2].
- pro společnost KROHNE jsou typické tyto rozměry: 2,5; 4; 6; 10; 15; 20; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 100; 125; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1200; 1400; 1600; 1800 a 2000 DN [7].
- Společnost SIMA dodává na trh indukční průtokoměry těchto světlostí: 40; 50; 65; 80; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600 a 800 DN [8].

Rozsah redukce	d (mm)	D (mm)	L (mm)	t (mm)
DN100 - DN40	40	107	200	5
DN200 - DN80	80	206	300	6

Obr.3.6. Tabulka rozsahů vyráběných redukcí



Obr.3.7. Univerzální kuželový přechod

Celková tlaková ztráta vzniklá použitím redukčních kuželů:

$$\Delta p = 0,5 \cdot \rho \cdot (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3) \cdot v_2^2 \quad [\text{Pa}] \quad (3.9)$$

Kde:

ρ - hustota kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] (pro vodu $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

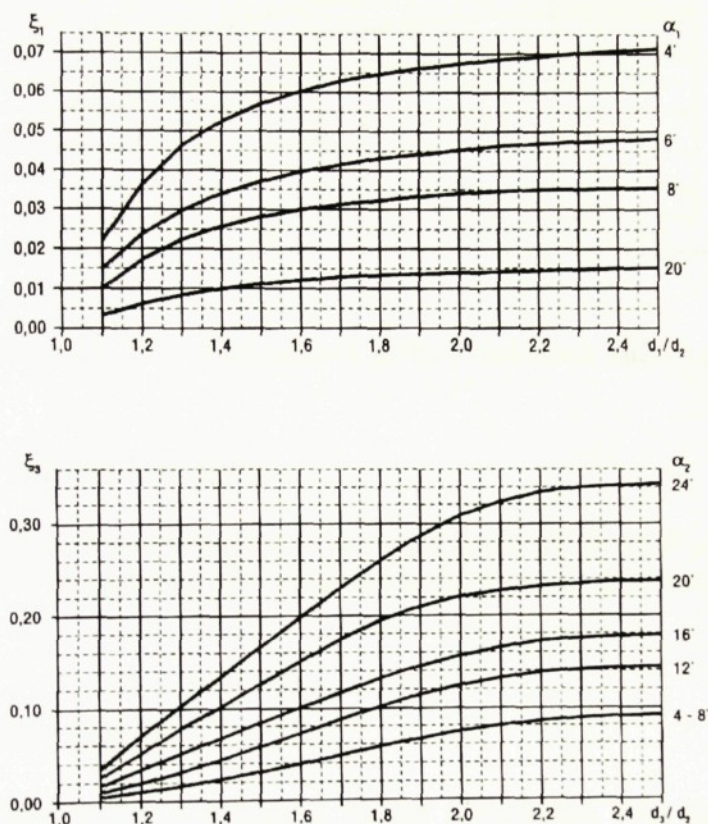
ξ_1 - ztrátový součinitel konfuzoru [-]

$\xi_2 = 0,02$ - ztrátový součinitel úseku $\varnothing d_2$ [-]

ξ_3 - ztrátový součinitel difuzoru [-]

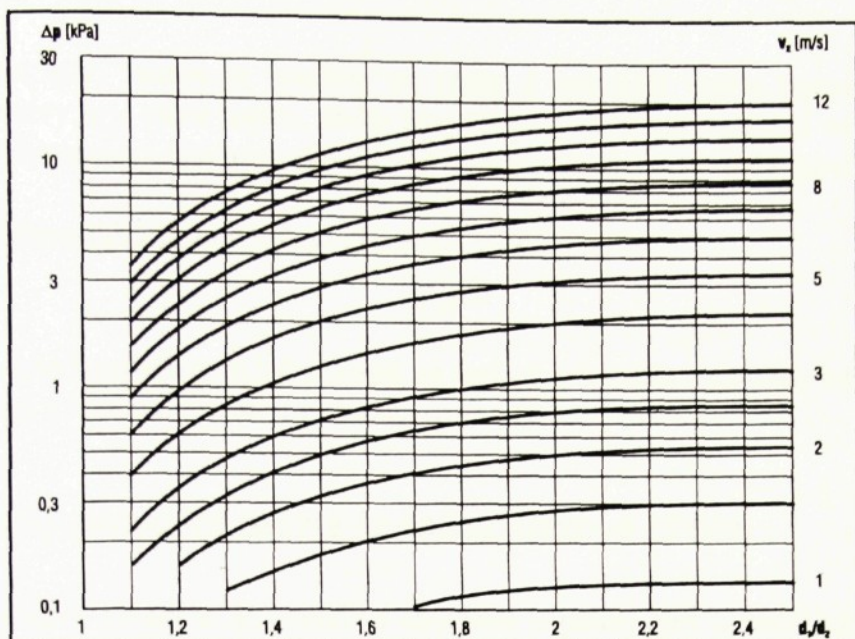
v_2 - střední objemová rychlost ve snímači [m.s^{-1}]

Ze vzorce 3.9 a z uvedených diagramů (obr.3.8) lze určit tlakovou ztrátu Δp pro různé kapaliny, a to při znalosti poměru světlosti potrubí a průtokoměru d_1/d_2 , d_3/d_2 a rychlosti média v_2 v průtokoměru. Diagram platí za předpokladu, že před a za průtokoměrem jsou instalovány přímé úseky potrubí světlosti d_2 při dodržení délky těchto úseků stanovených výrobcem [2] (viz. kapitola 6.)



Obr.3.8. Diagram pro určení tlakové ztráty redukčních kuželů

Z diagramu (obr.3.9) můžeme určit tlakovou ztrátu vody Δp pro vodu při znalosti poměru světlosti potrubí a průtokoměru d_1/d_2 a rychlosti média v_2 v průtokoměru. Diagram platí pro redukční kužely s úhlem 20° a za stejných předpokladů jako u předchozích diagramů (obr.3.8).



Obr.3.9. Diagram pro určení tlakové ztráty redukčních kuželů pro vodu.

3.3. Dynamika reálné kapaliny

Reálná kapalina, vazká kapalina, je skutečná kapalina narození od kapaliny ideální. Ve skutečné kapalině se uplatňují síly vnitřního tření, často ji však můžeme považovat za nestlačitelnou.[4]

3.3.1. Vnitřní tření kapalin

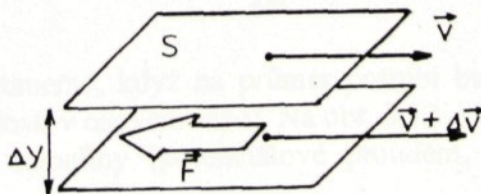
Mějme v kapalině dvě stejně velké plochy rovnoběžné s rychlostí dvou blízkých vrstev proudící kapaliny. Při označení dle obr.3.11 platí

$$\mathbf{F} = \eta S \frac{dv}{dy}$$

a odtud

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (3.10)$$

(Na spodní vrstvu na obr.3.11. o ploše S působí horní vrstva proti směru pohybu silou $\mathbf{F}$, jejíž velikost F je přímo úměrná velikosti plochy S a přírůstku rychlosti spodní vrstvy proti horní vrstvě dv a nepřímo úměrná vzdálenosti vrstev dy) [4].



Obr.3.11. Vnitřní tření

F je velikost síly, kterou je bržděna na ploše S rychlejší vrstva kapaliny působením pomalejší vrstvy. τ je tečné napětí, dv/dy nazýváme gradientem rychlosti ve směru kolmém k toku. η je dynamická viskozita (koeficient dynamické viskozity nebo koeficient vnitřního tření) [4].

Zavádíme také kinematickou viskozitu ν vztahem

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Oba tyto koeficienty silně závisejí na teplotě, u kapalin s rostoucí teplotou viskozita klesá, u plynů s rostoucí teplotou viskozita roste.[4]

3.3.2. Druhy proudění reálné kapaliny, tlaková ztráta

Laminární proudění je proudění skutečné kapaliny, při kterém kapalina proudí v úzkých rovnoběžných vrstvách, které se navzájem téměř nemísí. Víry, které vznikají vnitřním třením kapaliny, jsou mikroskopické, a proto prostým okem nepozorovatelné. K laminárnímu proudění dochází při malých rychlostech tekutiny, velké viskozitě a malých průměrech potrubí [4]. Vektor rychlosti je možné považovat za konstantní v celém průřezu.

Turbulentní proudění je proudění, při kterém vznikají působením vnitřního tření již viditelné víry, proto v každém místě proudící kapaliny se rychlost kapaliny co do velikosti i do směru s časem nemění, pohyb každého elementu kapaliny se jeví nepravidelný. Vrstvy se navzájem vlivem vírů intenzivně mísí. K turbulentnímu proudění dochází při velkých rychlostech proudící tekutiny, malé viskozitě a velkých průměrech potrubí.

Reynoldsovo číslo Re je definováno vztahem

$$Re = \frac{\bar{v}\rho d}{\eta}, \quad (3.11)$$

kde $\bar{v}$ je průměrná rychlost kapaliny v potrubí

$$(\bar{v} = \frac{1}{S} \int_S \mathbf{v} dS).$$

Přechod z laminárního proudění na turbulentní nastává při hodnotě Reynoldsova čísla 2000-3000 (kritická hodnota Re_k). Do této hodnoty Re_k je proudění laminární, nad touto hodnotou již přechází v turbulentní (přechodná oblast). Tzv. *plná turbulence* nastává až při hodnotě $Re > 10^4$.

Kritická rychlost, rychlost, pro kterou daná kapalina v daném potrubí dosahuje kritické hodnoty Reynoldsova čísla. Do kritické rychlosti proudí kapalina laminárně. Platí:

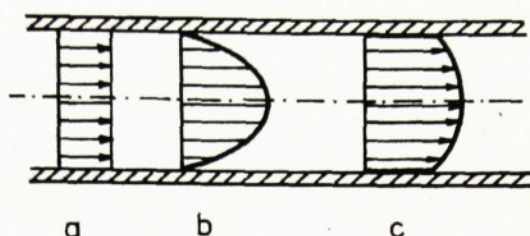
$$\bar{v}_k = Re_k \frac{\eta}{\rho d}$$

Rychlostní profil dostaneme, když na průměr potrubí budeme nanášet rychlost v daném místě (rozložení rychlostí v osovém řezu). Na obr. 3.12. je

- a) rychlostní profil ideální kapaliny (potenciálové proudění, rychlost je na průměru konstantní),
- b) rychlostní profil při laminárním proudění (parabola souosá s osou potrubí),

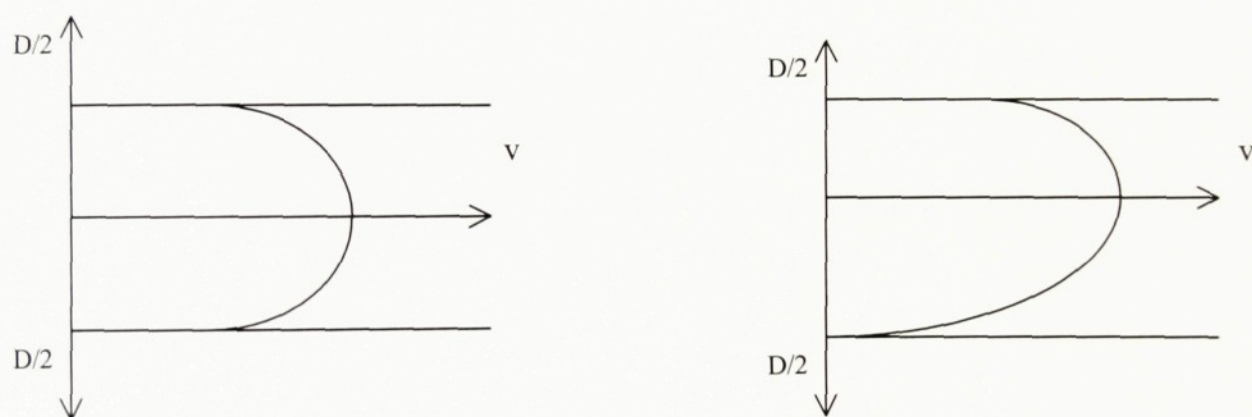
c) rychlostní profil při turbulentním proudění (zde nanášeny časové střední hodnoty rychlosti)

$$\bar{v} = \frac{1}{\Delta t} \int_{(\Delta t)} v dt$$



Obr. 3.12. Rychlostní profily

Pouze málo uživatelů indukčních průtokoměrů si uvědomuje vliv tvaru rychlostního profilu na přesnost měření. Pro dosažení požadované přesnosti měření rychlosti průtoku indukčním průtokoměrem musí být rychlostní profil průtoku osově symetrický (obr.3.13a). Nesymetrický rychlostní profil (obr.3.13 b) způsobí snížení výsledné přesnosti měření.[6]



Obr.3.13. a) osově symetrický rychlostní profil b) osově nesymetrický rychlostní profil

Disipace energie proudící kapaliny. Kapalina (plyn) při svém proudění koná neustále práci proti silám vnitřního tření. Tuto práci konají tlakové síly na útraty tlakové energie (ve vodorovném potrubí se potenciální energie v tíhovém poli nemění, v potrubí stálého průřezu při ustáleném proudění se nemění rychlost v důsledku platnosti rovnice kontinuity). Při proudění reálné tekutiny potrubím dochází proto k *tlakové ztrátě* Δp . Tlaková ztráta má význam energie disipované v jednotce objemu proudící kapaliny při průtoku danou částí potrubí. Tato energie přejde v energii neuspořádaného pohybu molekul a způsobí zahřátí proudícího média, proto říkáme, že se změní v teplo [4].

4. Posouzení vlivu vybraných hydromechanických poruch při měření indukčními průtokoměry

4.1. Stanovení základních podmínek

Praxe naneštěstí obsahuje spoustu rozmanitých tvarů uvnitř potrubí, které jsou na první pohled vyvolané zdánlivě neškodnými překážkami, ale jejich vliv na rychlostní profil je značný. Zabývat se všemi těmito anomáliemi potrubí by bylo nesmyslné a asi i nemožné. Při umísťování průtokoměrů do potrubí je v současné době častým problémem nedostatek místa, protože při návrhu rozvodů potrubí nebylo počítáno s umístěním měřičů průtoku, proto musí být průtokoměry umísťovány v těsné blízkosti ohybů potrubí soustředěných v různých rovinách vůči rovině elektrod, v blízkosti náhlých přechodů průměrů potrubí nebo při použití průtokoměru ve funkci dávkovačů, kde je ventil spotřebiteli vsouván přímo před průtokoměr. Nevýhodou je, že není možná kontrola přesnosti měření v daném místě.

Na základě technologických parametrů indukčních průtokoměrů jsem zvolila pro měření indukční průtokoměr se světlostí 40DN řady MP400, který se nachází uprostřed vývojové řady společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou. Při větším vnitřním průměru indukčního průtokoměru by nastaly potíže s výrobou clon a přizpůsobením měřicí linky. Naopak průtokoměry o menších světlostech jsou příliš malé a z toho důvodu ne moc průkazné.

Jak již bylo řečeno, je těžké definovat proudění v daném místě. Pro simulaci těchto poruch bylo nemožné vsouvat části potrubí o různých tvarech do měřicí linky, proto bylo nutné použít zjednodušení ve formě clon, které jsou vkládány před indukční průtokoměr. Různým tvarem otvorů clon, jejich umístěním v závislosti ke středu clony a natáčením clon vůči rovině elektrod jsou simulovány různé polohy roviny elektrod a ohybů potrubí. Různá velikost otvorů vyosených od středu clony napodobuje různé úhly ohnutí potrubí. Clony s vystředěným otvorem simulují náhlé přechody průměrů potrubí.

Pro měření na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o. byly vyrobeny clony s vyoseným elipsovitým otvorem, které mají za úkol simulovat proudění přímo za ventilem, který napodobují. Tvar této clony byl vzat přímo z ventilů dávkovacích automatů. Součásti dávkovacích automatů vyrábí německá firma FUSCH GmbH, u nás z nich montuje a provádí instalaci dávkovacích automatů společnost MSV Brno. Tato společnost používá indukční průtokoměry společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou. Na základě požadavku dvou maďarských mlékáren tato společnost zkompletovala a instalovala 15 dávkovacích automatů do jejich provozu. Po uvedení docházelo po náhodné době k nadávkování většího množství mléčných produktů. Bylo nutné zjistit, co tuto závadu způsobuje, proto byla provedena kontrola přesnosti měření indukčního průtokoměru. Při kontrole se zjistilo, že nebyly dodrženy předepsané vzdálenosti ventilu od průtokoměru a ventil byl umístěn přímo před průtokoměr. Proto byly vyrobeny clony o tvaru ventilu a bylo provedeno měření na cejchovací lince s cílem posouzení vlivu tohoto špatného umístění. Elipsovitý tvar otvoru ventilu je zde z důvodu dobré ovladatelnosti. Pomocí ventilu lze nastavovat průtok na 100, 50, 25 a 0%.

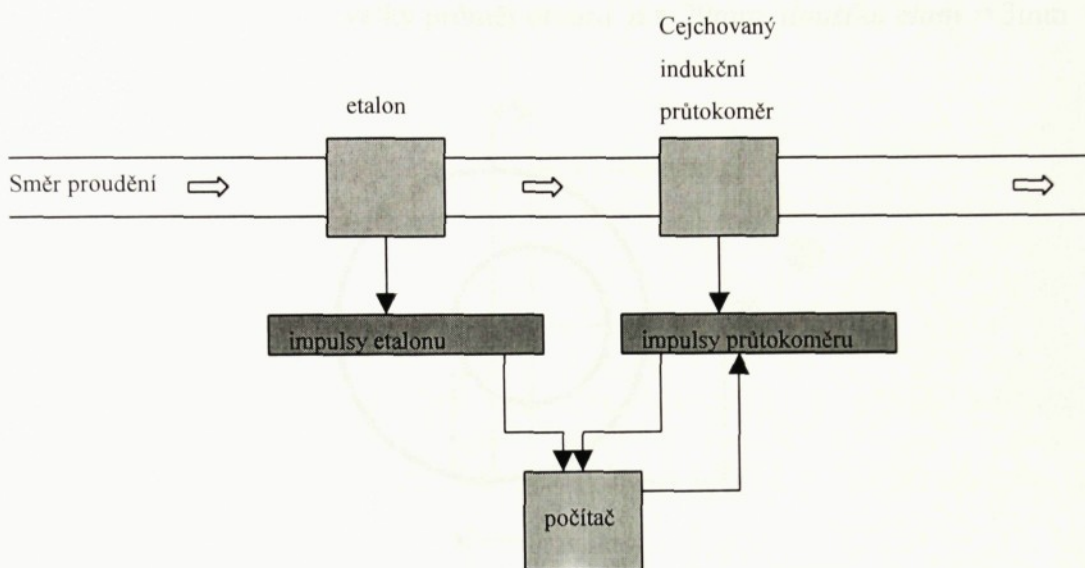
4.2. Princip cejchování indukčních průtokoměrů

Existují dva základní principy cejchování:

1. Váhový způsob
2. Objemový způsob

Váhový způsob cejchování indukčních průtokoměrů pracuje na principu, při kterém se pustí na určitou dobu proud vody do potrubí, ve kterém je umístěn cejchovaný průtokoměr. Na konci potrubí je umístěna nádoba na váze za účelem zachycení proteklého množství vody za stanovenou dobu. Po uplynutí stanovené doby dojde k určení hmotnosti proteklého množství vody v nádobě a ke srovnání této hmotnosti a hodnoty naměřené indukčním průtokoměrem. Účelem cejchování je, aby hodnota naměřená indukčním průtokoměrem odpovídala hodnotě zjištěné zvážení nádoby s vodou za dobu měření. Toto přizpůsobení měření indukčního průtokoměru se provádí vložení konstant podle cejchovací křivky do indukčního průtokoměru.

Objemový způsob cejchování indukčních průtokoměrů je založen na principu podle obrázku 4.1.



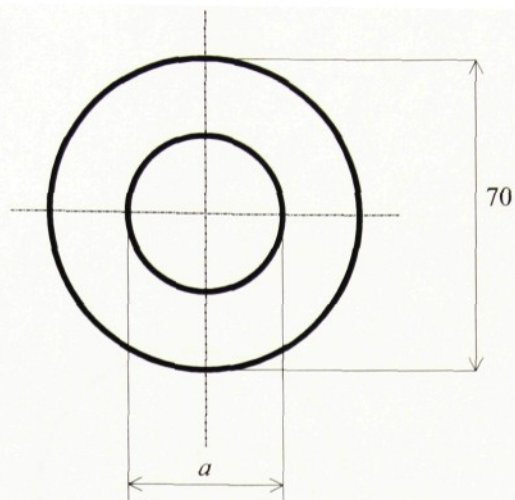
Obr.4.1. Princip cejchování indukčních průtokoměrů objemovým způsobem

Na základě srovnání impulsů naměřených etalonem a cejchovaným průtokoměrem dojde k přizpůsobení cejchovaného indukčního průtokoměru etalonu. Přizpůsobení se opět provádí pomocí programu, který vnesle do průtokoměru konstanty podle cejchovací křivky.

Tento způsob cejchování je použit na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou i na školní lince. Ve společnosti EESA s.r.o. jsou jako etalony použity průtokoměry firmy KROHNE, které jsou považovány za nejpreciznější.

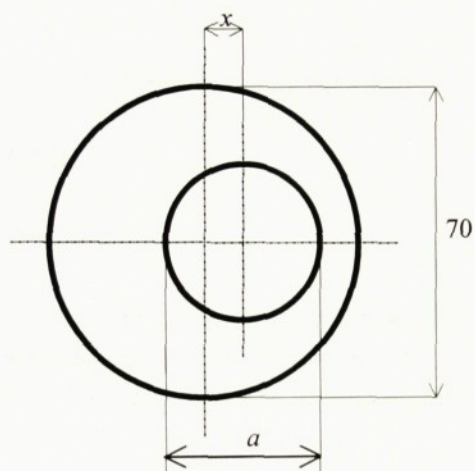
4.3. Parametry clon použitých pro simulaci deformací proudění

Clony použité pro měření na školní lince byly vyrobeny z pryže s textilní vložkou. Jejich parametry jsou:



Obr.4.2. Clona s vystředěná

Pro clonu vystředěnou (obr.4.2.): malý průměr otvoru: $a = 19\text{mm}$, tloušťka clony = 2mm
 střední průměr otvoru: $a = 24\text{mm}$, tloušťka clony = 2mm
 velký průměr otvoru: $a = 29\text{mm}$, tloušťka clony = 3mm

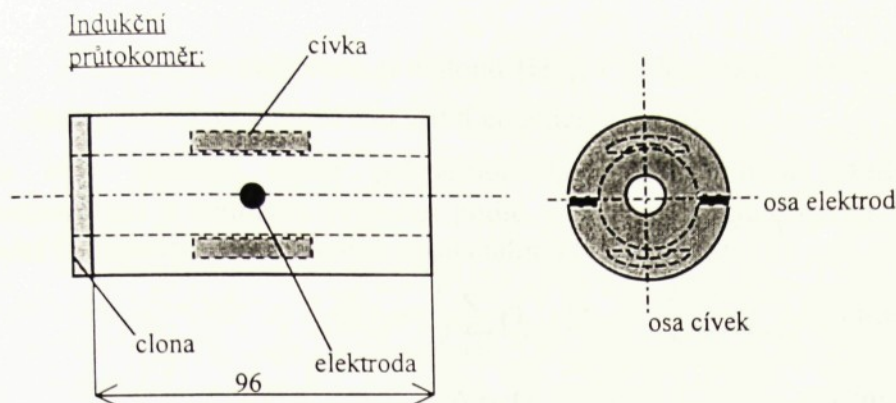


Obr.4.3. Clona vyosená od středu

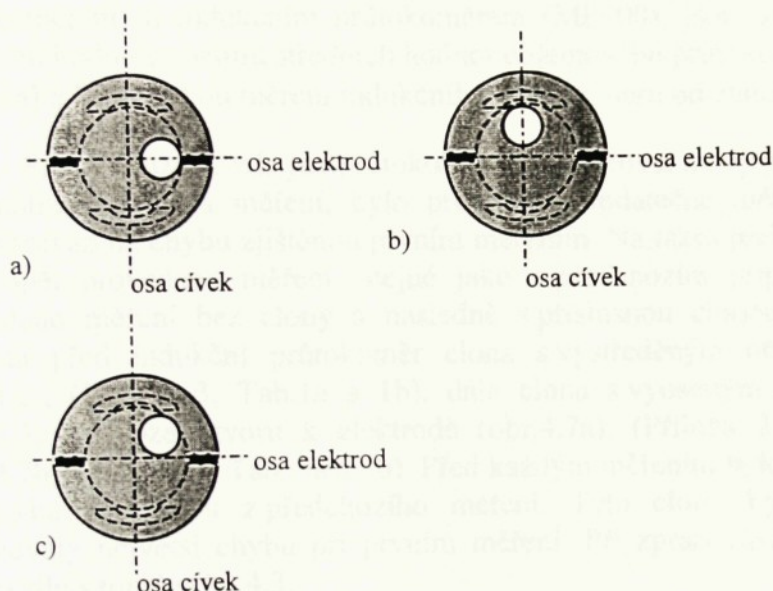
Pro clonu vyosenou (obr.4.3.): malý průměr otvoru: $a = 19\text{mm}$, tloušťka clony = 2mm
 střední průměr otvoru: $a = 24\text{mm}$, tloušťka clony = 2mm
 velký průměr otvoru: $a = 29\text{mm}$, tloušťka clony = 3mm

Clony použité pro měření na lince společnosti EESA s.r.o. byly vyrobeny z pryže s textilní vložkou, jejich parametry jsou následující (tloušťka všech clon je 3mm):

Pro clonu vyosenou (obr.4.4.): 2. Měření: $a = 15\text{mm}$, $b = 10\text{mm}$, $x = 5\text{mm}$, $y = 5\text{mm}$
 3. Měření: $a = 10\text{mm}$, $b = 5\text{mm}$, $x = 5\text{mm}$, $y = 5\text{mm}$
 4. Měření: $a = 5\text{mm}$, $b = 2,5\text{mm}$, $x = 5\text{mm}$, $y = 5\text{mm}$



Obr.4.6. Umístění otvoru a tvar clony použité pro měření



Obr.4.7. Umístění otvoru clony při použití clony s vyoseným otvorem

Vlastní měření:

Clona byla vždy vkládána přímo mezi indukční průtokoměr a přírubu ve směru toku kapaliny. Při každé výměně clony bylo nutno počkat 10 minut, které, jak bylo empiricky zjištěno, byly dostatečné pro uklidnění proudění v potrubí. To bylo po uplynutí této doby bez větších bublin, které by mohly narušovat měření.

Pro první měření byl použit indukční průtokoměr bez vložené clony (Příloha 2, Tab.1). Pro další měření byly postupně vkládány mezi indukční průtokoměr a potrubí clony s vystředěným otvorem podle obr.4.2, nejprve s vnitřním průměrem otvoru clony 29mm, (Příloha 2, Tab.2), poté clona s otvorem o vnitřním průměru 24mm (Příloha 2, Tab.3) a jako poslední clona s otvorem o vnitřním průměru 19mm (Příloha 2, Tab.4). Umístění clony je uvedeno na obr.4.6. Pro další měření byly použity clony, jejichž umístění je uvedeno na obr.4.7 a parametry na obr.4.3 (Příloha 2, Tab.5-13).

Při každém měření bylo nutné odečítat frekvenci etalonu a hodnotu průtoku přímo z indukčního průtokoměru v [l/min]. Na základě frekvence etalonu bylo možné spočítat objemové množství kapaliny proteklé etalonem podle vzorce:

$$Q_{v,e} = f_e \cdot k \quad [\text{l/min}]$$

(4.1)

Kde f_e je frekvence naměřená u etalonu [Hz], k je konstantou etalonu ($k= 0,0001 \text{ m}^3$) a $Q_{v,e}$ značí proteklé objemové množství etalonem [l/min].

Dále bylo důležité zjistit průměrnou hodnotu z hodnot naměřených indukčním průtokoměrem a etalonem (výpočet podle vzorce 4.2), jejich rozdíl Δ a následně chybu měření indukčního průtokoměru E od etalonu (vzorec 4.3).

$$\bar{Q}_{v,e} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{vi,e}, \bar{Q}_{v,p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{vi,p} \quad [\text{l/min}] \quad (4.2)$$

$$\Delta = \left| \bar{Q}_{v,e} - \bar{Q}_{v,p} \right| \quad [\text{l/min}]$$

$$E = (\Delta / \bar{Q}_{v,e}) \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.3)$$

$\bar{Q}_{v,e}, \bar{Q}_{v,p}$ znamenají střední hodnoty objemového průtoku etalonem (vrtulkovým průtokoměrem) a indukčním průtokoměrem (MP400), jsou uvedeny v [l/min], Δ značí absolutní hodnotu rozdílu středních hodnot objemového průtoku etalonem a průtokoměrem v [l/min] a E je chybou měření indukčního průtokoměru od etalonu [%].

Pro posouzení, zda jde průtokoměr překalibrovat na zjištěnou chybu, aby se mohla minimalizovat chyba měření, bylo provedeno dodatečné měření, kdy byl průtokoměr nakalibrován na chybu zjištěnou prvním měřením. Na takto překalibrovaném průtokoměru bylo opět provedeno měření, stejné jako v předchozím případě. Vždy bylo nejdříve provedeno měření bez clony a následně s příslušnou clonou. Pro první měření byla vsunuta před indukční průtokoměr clona s vystředěným otvorem středního průměru (obr.4.2), (Příloha 3, Tab.1a a 1b), dále clona s vyoseným otvorem malého průměru (obr.4.3) v poloze otvoru k elektrodě (obr.4.7a), (Příloha 3, Tab.2a a 2b) a k cívce (obr.4.7b), (Příloha 3, Tab. 3a a 3b). Před každým měřením bylo nutno clonu překalibrovat na chybu spočtenou z předchozího měření. Tyto clony byly zvoleny z důvodu, že vykazovaly největší chybu při prvním měření. Při zpracovávání měření se postupovalo opět podle vzorců 4.1 - 4.3.

4.4.1.1. Přehled výsledků a závěry vyplývající z měření získaného na školní lince

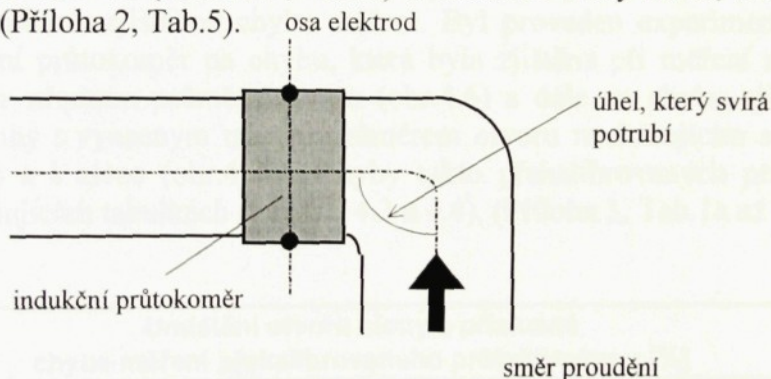
Umístění otvoru clony a příslušná chyba měření v [%]					
Umístění otvoru clony:	vystředěný	otvor clony k elektrodě	otvor clony k cívce	otvor clony mezi elektrodou a cívkou	bez clony
	obr.4.6	obr.4.7a	obr.4.7b	obr.4.7c	
velký otvor ($a = 29\text{mm}$)	3,78	4,00	1,54	4,29	
střední otvor ($a = 24\text{mm}$)	4,34	4,39	3,98	4,38	
malý otvor ($a = 19\text{mm}$)	3,86	4,48	4,30	4,30	
bez clony					0,72

Tab.4.1. Shrnutí výsledků měření na školní lince

Indukční průtokoměr bez clony vykázal chybu (Příloha 1, Tab.1) 0,72 %, což nám ukazuje, že byl dobře nakalibrován.

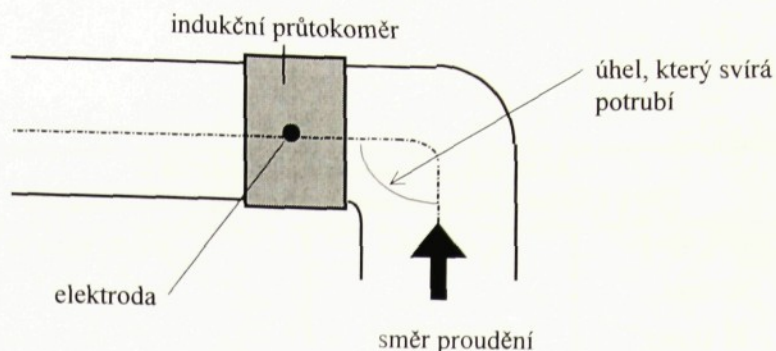
Použití clon s vystředěným otvorem mělo za úkol simulovat deformaci proudění při náhlé změně průřezu potrubí. Při použití clony s vystředěným otvorem (obr.4.2, umístění obr.4.6) byla zjištěna chyba měření indukčního průtokoměru u velkého otvoru (Příloha 2, Tab.2) 3,78 %, která základnímu požadavku přesnosti nevyhovuje. Znatelně větší chybu vykázal indukční průtokoměr při použití clony se středním otvorem (Příloha 2, Tab.3), kde byla naměřena hodnota 4,34%. O něco menší chybu 3,86 % můžeme sledovat při použití clony s malým průměrem otvoru (Příloha 2, Tab.4). Proudění před a za těmito clonami můžeme charakterizovat obrázky 5.8 a 5.9. Tyto obrázky znázorňují náhlé zúžení a následné rozšíření průřezu za clonou, náhlé rozšíření průřezu za clonou nám způsobí zvětšení rychlosti proudění, odtržení kapaliny od stěn a vznik vírů, na určité délce rozšířeného potrubí se pak proud rozšíří znovu po celém průřezu. Je zřetelné, že velikost středního otvoru způsobila největší chybu měření.

Umístěním otvoru na straně elektrody (obr.4.7a, tvar obr.4.3) dojde opět ke zvýšení rychlosti proudění jako v předchozím případě, ale s rozdílem, že v měřící "úsečce" elektrod jsou různé rychlosti (na straně elektrody, kde se nachází otvor, se rychlost zvýší, na straně druhé elektrody se rychlost naopak zmenšuje vlivem překážky proudění, kterou vznikají i vířivé oblasti), které mají výrazný vliv na přesnost měření indukčního průtokoměru. Proudění v tomto případě můžeme přirovnat k proudění za ohybem potrubí, který je umístěn podle obr.4.8. Musíme říci, že čím menší bude otvor clony, tím menší bude úhel, který svírá potrubí. Při měření bez clony svírá potrubí úhel 180° , použitím clon s postupně se zmenšujícím otvorem se tento úhel zmenšuje. Toto umístění otvoru má největší vliv při malém otvoru clony (4,48 %, Příloha 2, Tab.11), dále následuje střední otvor, který způsobil chybu měření 4,39 % (Příloha 2, Tab.8) a nakonec velký otvor, který zavinil chybu měření 4,00 % (Příloha 2, Tab.5).



Obr.4.8. Tvar potrubí simulovaný clonou, jejíž otvor je umístěn k elektrodě

Při umístění otvoru clony k cívce (obr.4.7b, tvar obr.4.3) můžeme proudění charakterizovat tímto způsobem: U jedné cívky (na jejíž straně je umístěn otvor) není proud kapaliny omezován žádnou překážkou, na druhé straně (u druhé cívky) před clonou nemůže proud kapaliny sledovat tvar stěn, proto se odtrhne a vzniknou vířivé oblasti (obr.5.9), za clonou můžeme proudění charakterizovat opět obr.5.8. Toto umístění otvoru nejvíce ovlivňuje měření indukčního průtokoměru při malém otvoru clony (Příloha 2, Tab.12), kde byla dosažena chyba 4,30 %. Naopak clona s velkým otvorem (Příloha 2, Tab.6) vykázala chybu jen 1,54 %. Lze předpokládat, že tok v úrovni elektrod je již více zklidněný, aby v tak výrazné míře neovlivnil měření. U clony se středním průměrem otvoru (Příloha 2, Tab.9) byla naměřena chyba 3,98 % od etalonu. Clona s otvorem umístěným k cívce simulovala poruchy proudění za ohybem potrubí naznačeném na obr.4.9.



Obr.4.9. Tvar potrubí simulovaný clonou, jejíž otvor je umístěn k cívce

Jako poslední umístění, bylo umístění otvoru clony mezi elektrodou a cívkou (obr.4.7c, tvar obr.4.3). Při tomto stavu nedošlo k žádné výrazné změně při vsunutí clon s různými velikostmi otvoru od předchozích měření. Chyba měření dosahovala hodnot 4,30 % (u malého otvoru, Příloha 2, Tab.13), 4,38 % (u středního otvoru, Příloha 2, Tab.10) a 4,29 % (u velkého otvoru, Příloha 2, Tab.7). Tato poloha otvoru clony opět charakterizuje ohyb potrubí umístěný v těsné blízkosti před průtokoměrem.

Nejvíce bylo měření indukčního průtokoměru ovlivněno při použití clony s vyoseným otvorem umístěným mezi elektrodou a cívkou (obr.4.7c) a k elektrodě (obr.4.7a). Při umístění k elektrodě se chyba zvyšovala se zmenšováním použitého otvoru clony. Menší chyba byla zjištěna při použití clon s vystředěným otvorem. Zdánlivě nejmenší vliv na přesnost měření mělo umístění clony s vyoseným otvorem k cívce.

Pro snížení chyby měření indukčních průtokoměrů v potrubích, kde vznikají nerovnoměrné rychlostní profily, bylo zkoušeno, zda je možné překalibrování indukčního průtokoměru na jednotlivou zjištěnou chybu měření. Byl proveden experiment, kdy byl překalibrován indukční průtokoměr na chybu, která byla zjištěna při měření s vloženou clonou o vystředěném středním průměru otvoru (obr.4.6) a dále na chybu zjištěnou při měření s použitím clony s vyoseným malým průměrem otvoru nacházejícím se v poloze k elektrodě (obr.4.7a) a k cívce (obr.4.7b). Chyby takto překalibrovaných průtokoměrů jsou uvedeny v následujících tabulkách (tab.4.2, 4.3 a 4.4), (Příloha 3, Tab.1a až 3b).

Umístění otvoru clony a příslušná chyba měření překalibrovaného průtokoměru v [%]		
Umístění otvoru clony:	<i>bez clony</i>	<i>vystředěný</i> obr.4.6
<i>střední otvor (a = 24mm)</i>	4,02	0,76

Tab.4.2. Přehled výsledků po překalibrování průtokoměru, otvor clony střední a vystředěný

Umístění otvoru clony a příslušná chyba měření překalibrovaného průtokoměru v [%]		
Umístění otvoru clony:	<i>bez clony</i>	<i>otvor clony</i> <i>k elektrodě</i> obr.4.7a
<i>malý otvor (a = 19mm)</i>	4,40	0,77

Tab.4.3. Přehled výsledků po překalibrování průtokoměru, otvor clony malý, umístěný k elektrodě

Umístění otvoru clony a příslušná chyba měření překalibrovaného průtokoměru v [%]		
Umístění otvoru clony:	<i>bez clony</i>	<i>otvor clony</i> <i>k cívce</i> obr.4.7b
<i>malý otvor (a = 19mm)</i>	4,00	0,25

Tab.4.4. Přehled výsledků po překalibrování průtokoměru, otvor clony malý, umístěný k elektrodě

Na základě tohoto experimentu bylo zjištěno, že je možné indukční průtokoměr překalibrovat, ale pouze v případech zaručujících statické podmínky při měření.

Otázkou je, jak zjistit, jakou chybu vykazuje průtokoměr v praxi, kde není možná kontrola správnosti měření.

4.4.2. Měření na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o.

Čidlo bylo nejprve upnuto do cejchovací linky, která je znázorněna na obr.4.10.



Obr.4.10. Cejchovací linka

Uklidňovací délka před i za indukčním průtokoměrem byla $5 \times DN$. Vždy bylo nutno počkat opět cca 5 minut pro zaplnění potrubí a uklidnění tekutiny.

Nejprve byl indukční průtokoměr nakalibrován. Poté byl v programu počítače napojeného na cejchovací linku nastaven počet litrů, který má protéci etalonem, tj. při 30 l/min byl nastaven na 100 litrů a při 500 l/min bylo zvoleno 1000 litrů. Kalibrační linka načítá impulsy indukčního průtokoměru (MP400) a etalonu. Po protečení 100 litrů vyhodnocovací počítač kalibrační linky spočítá relativní chybu protečených objemů při

daném průtoku. V tabulkách v Příloze 3 jsou uvedeny: vypočtený průtok etalonem a indukčním průtokoměrem, který byl dán protečeným objemem a dobou protékání. Konstanta průtokoměru K_p byla nastavena na hodnotu 100 imp/dm^3 .

Stejný průběh mělo měření při nastaveném průtoku asi 500 l/min . Po měření bez clony byly postupně vsouvány přímo před průtokoměr clony uvedené na obr.4.4. Měření probíhalo opět pro průtok 30 a 500 l/min . Clony měly vyosený otvor (obr.4.4), který byl vkládán do polohy k elektrodě a k cívce podle obr.4.7a a 4.7b.

4.4.2.1. Přehled výsledků a závěry vyplývající z měření získaného na cejchovací lince

Legenda k tabulce 4.5 a grafu 4.1:

A...průtok cca 30 l/min

B...průtok cca 500 l/min

1...měření bez clony

2...vyosený elipsový otvor clony velký (tvar a parametry otvoru viz kapitola 4.3, obr.4.4)

3...vyosený elipsový otvor clony střední (tvar a parametry otvoru viz kapitola 4.3, obr.4.4)

4...vyosený elipsový otvor clony malý (tvar a parametry otvoru viz kapitola 4.3, obr.4.4)

a...otvor clony umístěný k elektrodě (poloha podle obr.4.7a)

b...otvor clony umístěný k cívce (poloha podle obr. 4.7b)

	Chyba měření v %	
	A (cca 30 l/min)	B (cca 500 l/min)
1	0,04	0,05
2a	3,57	7,05
2b	2,14	2,84
3a	7,39	15,17
3b	4,38	9,40
4a	12,70	25,00
4b	5,92	14,10

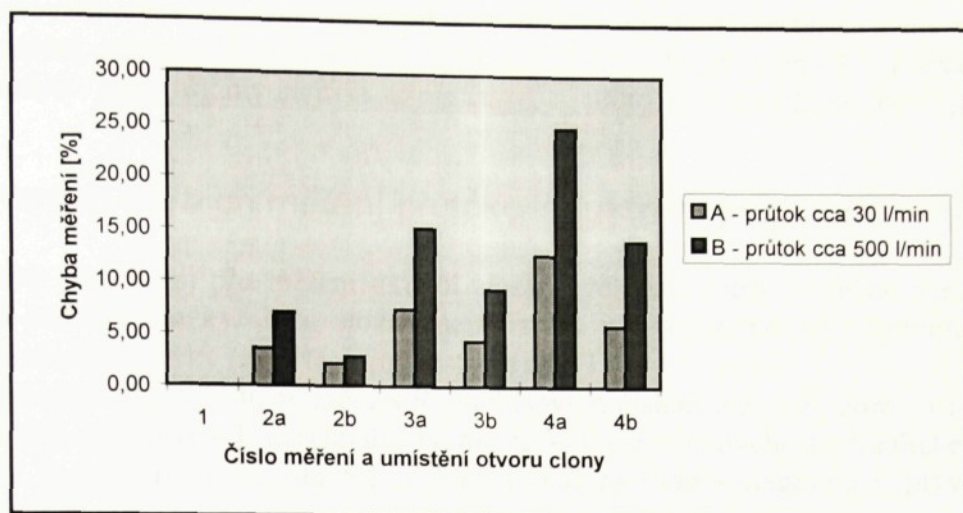
Tab.4.5. Shrnutí výsledků měření na cejchovací lince spol. EESA s.r.o.

Jak je z tabulky 4.5 patrné, indukční průtokoměr při měření bez clony vykázal chybu měření při průtoku 30 l/min $0,04\%$ a při průtoku 500 l/min chybu $0,05\%$ (Příloha 4, 1.měření, Tab.A1 a B1). Při vložení clony s vyoseným velkým elipsovitým otvorem (Příloha 4, 2.měření), nejprve k elektrodě (obr.4.7a), byl zaznamenán růst chyby měření při sledovaných průtocích na $3,57$ a $7,05\%$ (Tab.A2a a B2a). Při poloze otvoru clony k cívce (obr.4.7b) byla naměřena chyba nižší než v předchozím případě, to je $2,14$ a $2,84\%$ (Tab.A2b a B2b) opět na sledovaných průtocích. Při měření s clonou s vyoseným středním elipsovitým otvorem (Příloha 4, 3.měření) byla výsledná chyba měření $7,39$ a $15,17\%$ při umístění otvoru k elektrodě (Tab.A3a a B3a) a k cívce $4,38$ a $9,40\%$ (Tab.A3b a B3b). Největší chyby měření byly zaznamenány po vsunutí clony s vyoseným malým elipsovitým otvorem (Příloha 4, 4.měření), a to při umístění k elektrodě $12,70$ a $25,00\%$ (Tab. A4a a B4a) a k cívce $5,92$ a $14,10\%$ (Tab.A4b a B4b).

V grafu 4.1 můžeme názorně sledovat vývoj chyby při jednotlivých měřeních. U měření číslo 1, to je měření bez clony, byla zjištěna chyba při obou průtocích tak malá, že v porovnání s ostatními chybami se ve zvoleném měřítku jeví jako nulová.

Porovnáním hodnot v tabulce 4.5 zjistíme, že chyba měření indukčního průtokoměru stoupá se zmenšováním otvoru a zvyšováním rychlosti průtoku. Větší chybu vykázalo měření, kdy byl otvor clony umístěn k elektrodě. Při dalším porovnání těchto

hodnot, je patrné, že chyba na nižším a vyšším průtoku u některých měření je dvojnásobná, na druhé straně při druhém měření s otvorem k cívce můžeme sledovat chybu jen o něco málo vyšší při průtoku 500 l/min než při průtoku 30 l/min. Naopak při 4.měření s otvorem clony k cívce je chyba na nižším průtoku téměř 2,5 krát menší.



Graf 4.1. Grafické znázornění chyb měření pro všechna měření na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o.(viz legenda na začátku této kapitoly)

Dalo by se říci, že nejen se zmenšováním otvorů clon a zvyšováním rychlostí, ale i s větší nepravidelností otvorů, bude chyba měření indukčního průtokoměru vzrůstat.

5. Vliv charakteru proudění kapaliny na činnost indukčních průtokoměrů

5.1. Mechanika tekutin, rychlostní profil

Měřenou kapalinu nemůžeme v žádném případě považovat za ideální. Podívejme se nyní, jaké skutečné rychlostní poměry se odehrávají v průřezu čidla a jaký mají dopad na přesnost měření.

Měření okamžitého průtoku je v našem případě založeno na přímém měření střední rychlosti (průtoková rychlost). Tato rychlost neodpovídá rychlosti každé částice v měřicím průřezu. Ve skutečnosti jsou tyto rychlosti různé podle sil, které v daném místě působí. Jedná se zejména o setrvačnost, viskozitu, tlak atd.[1]

Rychlost v jednom bodě měřicího průřezu může mít nejvíce tři složky:

- axiální (vektor rovnoběžný s osou měřicí trubice, který se určuje přímo měřením průtoku),
- radiální (vyvolanou gradientem rychlosti),
- rotační nebo tangenciální (způsobenou točivým pohybem toku).

Velikost všech tří složek je značně proměnlivá. Určitě nelze předpokládat rovnoměrné rozložení lokálních axiálních rychlostí. Lze očekávat, že maximální rychlosti jsou v ose potrubí a minimální u stěn [1].

Při nízkých rychlostech převažují viskózní síly. Postupným zvyšováním průtoku ustupuje vliv viskozity a začínou přetrvávat setrvačné síly. Tento poměr sil se vyjadřuje Reynoldsovým číslem Re (vzorec 3.11). Tento parametr mechanické podobnosti vyjadřuje

poměr mezi setrvačnými a třecími silami. Rozložení axiálních sil se vyjadřuje graficky jako rychlostní profil (obr. 5.1). Znalost profilu v určitém čase umožňuje určení průtokové rychlosti.

Bezchybné měření okamžitého průtoku se může uskutečnit jenom tehdy, když je v daném okamžiku známo rozložení lokálních axiálních rychlostí [1].

Nerespektování výše uvedené podmínky je hlavní příčinou nezdarů, které nás potkávají při měření průtoku. Podívejme se nyní na příčiny, které znemožňují určení rychlostního profilu. Tyto příčiny nejsou ohraničeny, a proto si vysvětlíme jen jejich princip vzniku.

5.2. Příčiny vzniku chyb při měření průtoku indukčním průtokoměrem

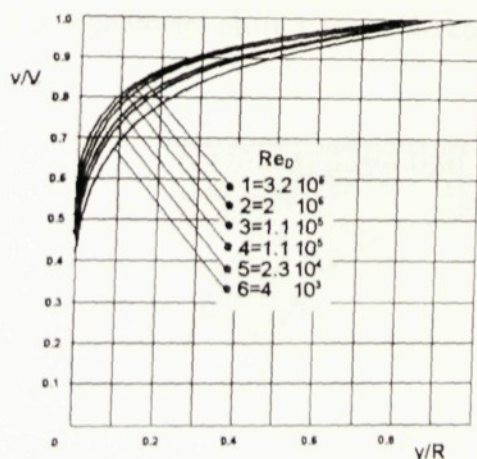
Průtokoměr je přístroj pro měření axiální složky rychlosti, který částečně bere v úvahu rotační a radiální složky. Tyto složky nelze zcela ignorovat, protože podmiňují lokální fyzikální charakteristiky (tlak, teplotu, hustotu atd.) [1].

Průběh rychlostního profilu se mění s Reynoldsovým číslem Re (viz vzorec 3.11). Rozložení lokálních rychlostí v k maximální rychlosti V v ose válcového hydraulického hladkého potrubí je znázorněno na obr. 5.1. Z hlubší analýzy tohoto diagramu vyplývají následující souvislosti:

- Skutečná průtoková rychlost u stěny průtokoměru kolísá v rozmezí od 0,22 až 0,3 maximální rychlosti [1].
- Poměr střední rychlosti k maximální rychlosti V v ose průtokoměru je přibližně v rozsahu od 0,78 do 0,85 [1].
- Gradient rychlosti je tím větší, čím blíže jsme u stěny potrubí [1].

Tvar rychlostního profilu ovlivňuje zejména drsnost stěn potrubí. Obrázek 5.2 ukazuje změnu průběhu rychlostního profilu pro konstantní Reynoldsovo číslo v závislosti na relativní drsnosti y/R (poměr drsnosti stěny y a vnitřního průměru čidla R). Veličina y se nazývá rovnoměrná ekvivalentní drsnost. Je definována pouze experimentálně [1].

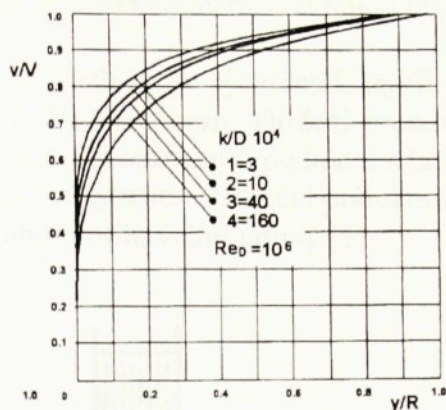
V našem případě indukčního průtokoměru předpokládáme kruhový průřez měřící dutiny. Drsnost dutiny je díky vhodné konstrukci elektrod a čidla na celém vnitřním povrchu stejná. Předpokládáme, že čidlo nezhoršuje symetrii rychlostního profilu. Měřicí elektrody jsou umístěny v příčné ose a sledují tak rychlostní profil pouze jedné z nekonečně mnoha polorovin, radiálně souměrných podle axiální osy [1].



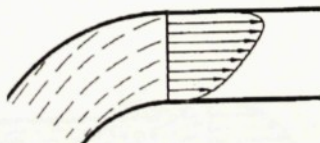
Obr.5.1. Rozložení lokálních rychlostí v k maximální rychlosti V v ose válcového hydraulicky hladkého potrubí

Podívejme se nyní na to, jaké mohou nastat typické příklady deformace rychlostního profilu, které ovlivňují zásadně přesnost měření indukčního průtokoměru při nevhodné volbě měřicího místa a polohy měřicí dutiny.

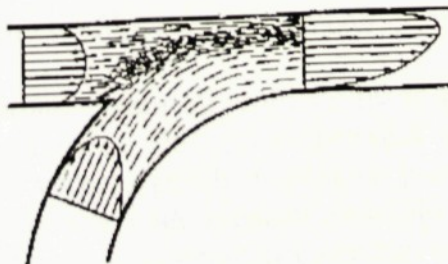
Je třeba zdůraznit, že rychlostní profil je ovlivněn komplexem rušivých prvků, které jsou i v poměrně velké vzdálenosti před měřicím místem a ne jenom rušením v jeho bezprostřední blízkosti. Deformace rychlostního profilu může být znatelná až ve vzdálenosti stovek D . Rušivé prvky umístěné za čidlem zhoršují rychlostní profil stejným způsobem.



Obr.5.2. Průběh rychlostního profilu pro konstantní Reynoldsovo číslo v závislosti na relativní drsnosti y/R (poměr drsnosti stěny y a vnitřního průměru čidla R)



Obr.5.3. Rychlostní profil v těsné blízkosti za ohybem potrubí.

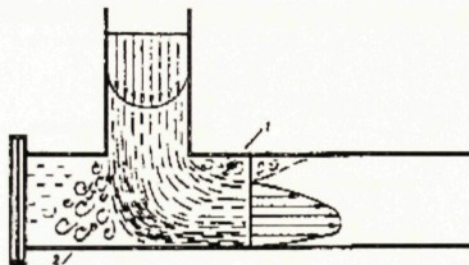


Obr. 5.4. Rychlostní profil na výstupu spoje dvou potrubí.



Obr.5.5. Rychlostní profil za částečně otevřenou klapkou ventilu.

Nejhorší případ nastane, jestliže je rychlostní profil ovlivněn geometrickými nepravidelnostmi uvnitř potrubí. Ty vyvolávají odtržení proudnic, jak je znázorněno na obrázcích 5.6 a 5.7 v bodech 1 a 2. Při odtržení proudnic dochází k lokálním vírům a část dílčích rychlostních vektorů má opačný směr. Indukční průtokoměr rozlišuje směr toku a je na tyto nehomogenity rychlostního profilu velmi citlivý [1].



Obr. 5.6. Rychlostní profil za pravoúhlým připojením potrubí.



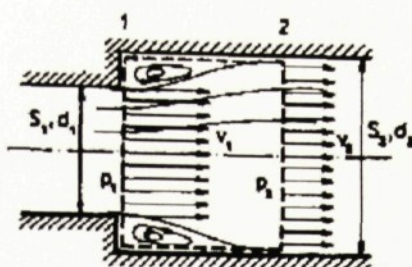
Obr. 5.7. Rychlostní profil v případě špatného vyrovnání přírub.

Obrázek 5.7 nám znázorňuje rychlostní profil v případě špatného vyrovnání přírub. Tento případ se sice může vyskytnout, ale v provozní praxi při cejchování indukčních průtokoměrů není možné velké vyosení přírub indukčních průtokoměrů při skládání do cejchovací linky. Jak bylo vyzkoušeno, malé světlosti nedovolují větší vyosení přírub než 2mm, velké světlosti maximálně 4mm. Vyosením sice vznikají poruchy proudění, které se, jak bylo v praxi zjištěno, výraznou měrou nepodílí na nepřesnosti cejchování. Takto nacejchované průtokoměry splňují základní požadavek přesnosti.

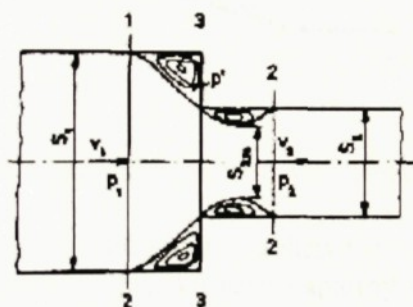
V praxi se velice často vyskytují nepravidelnosti, které jsou na první pohled vyvolané zdánlivě neškodnými překážkami, ale jejich vliv na rychlostní profil je značný. Do této skupiny patří například vnitřní švy po svařování, stažení potrubí za svárem,

přechody na různé průměry, kaly a usazeniny, pevné částice unášené měřenou kapalinou, ale i kotelní kámen [1].

Při náhlém rozšíření průřezu (obr.5.8) se odtrhne proud kapaliny od stěn a vytvoří se víry. Na určité délce rozšířeného potrubí se proud kapaliny rozšíří znovu po celém průřezu. Se změnou rychlosti je spojena změna tlaku. Při rozšíření průřezu klesá střední rychlost, a proto musí stoupnout tlak. V případě náhlého zúžení průřezu (obr.5.9) se naopak zúžením průřezu vyvolá zrychlení kapaliny. Proud kapaliny nemůže následkem setrvačnosti sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne a vzniknou vířivé oblasti.[3]



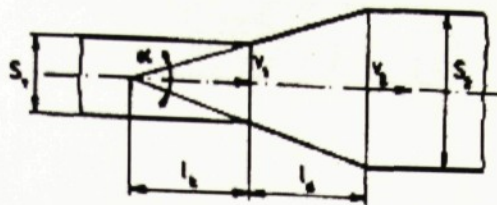
Obr.5.8. Náhlé rozšíření průřezu (rychlostní profil)



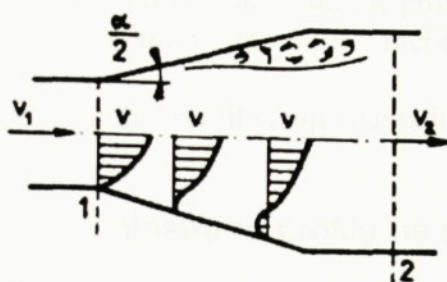
Obr.5.9. Náhlé zúžení průřezu (rychlostní profil)

Co se týče difuzorů (viz. Kap.3.2.2., redukční kužely), je známo, že velmi malé rozšíření průřezu znatelně ovlivní proudění, a to zejména rychlostní profil, který je tím více protažen ve směru proudění, čím je úhel rozšíření větší. Jak bylo experimentálně zjištěno, do úhlu rozšíření $\alpha = 6^\circ$ až 8° zůstává protažený rychlostní profil symetrický k ose difuzoru. Při dalším zvětšení úhlu se proud odtrhne od stěny a symetrie proudu se poruší. Příčiny odtržení záleží v mezní vrstvě na stěně difuzoru, kde rychlost částic kapaliny se rychle zmenšuje až na nulu. Při rozšíření průřezu dochází ke zvýšení statického tlaku v souladu s Bernoulliho rovnicí, neboť se střední rychlosti zmenšují. Statický tlak se mění v celém průřezu. Rychlost kapaliny klesá ve směru proudu a v jistém místě dochází k tomu, že kinetická energie částic u stěny je tak malá, že nestačí překonat statický tlak, který vzrůstá ve směru proudu [3]. Účinkem tohoto tlakového gradientu se proud kapaliny odtrhává od stěny (obr.5.11). Při úhlech rozšíření $\alpha = 10^\circ$ až 50° nastává odtržení proudu zpravidla od jedné stěny, na níž je rychlost menší. Jakmile nastane odtržení proudu, statický tlak nevzrůstá nebo velmi málo. Proto nemůže dojít k odtržení proudu na protější stěně a rychlostní profil se stane nesymetrickým. Nesouměrnost proudu je často

doprovázena nestabilním odtrháváním, což vyvolá kmitání proudu (pulsace) a tvoření vírů. V difuzorech s většími úhly rozšíření než 50° a 60° nemůže proud sledovat stěny difuzoru a odtrhává se po celém průřezu. Nastává intenzivní odtrhávání od stěny, které je doprovázeno menšími pulsacemi proudu.[3]

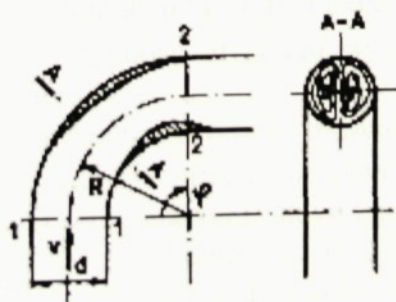


Obr.5.10. Kuželové potrubí (difuzor)



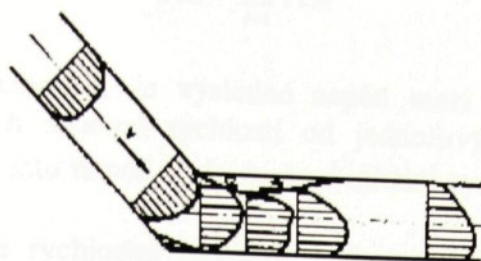
Obr.5.11. Rychlostní profily v difuzoru

Na obr.5.12 je znázorněno proudění v zakřiveném potrubí. Pomalejší částice kapaliny brzdí rychlejší částice, přičemž u skutečné kapaliny se částice přemisťují na větší nebo menší poloměr. Vzniká tak složitý (spirálový) prostorový pohyb. Součástí tohoto proudění je vířivé proudění v příčném řezu, charakteristické dvěma víry opačného smyslu. Proud na vnitřní straně kanálu se může odtrhnout, takže vznikají víry i u stěn.[3]



Obr.5.12. Proudění v zakřiveném potrubí

Deformace rychlostního profilu skutečné kapaliny v lomeném potrubí je vyznačena na obr.5.13.



Obr.5.13. Rychlostní profily v lomeném potrubí

Všechny výše uvedené případy rušení rychlostního profilu mají jeden společný bod. Rychlostní profil není v žádném z uvedených případů souměrný kolem axiální osy potrubí. To znamená, že nemůže být axiálně souměrný ani v dutině průtokoměru. Důsledkem je to, že přesnost měření závisí na radiálním nastavení měřící poloroviny indukčního průtokoměru [1].

Velký podíl na rušení rychlostního profilu mají i čerpadla.

5.3. Vliv nerovnoměrného rychlostního profilu na indukční měření průtoku

Metoda indukčního měření průtoku patří mezi nepřímé metody. Spočívá v tom, že se sledují důsledky proudící kapaliny v magnetickém nebo elektrickém poli. Již dříve jsme předpokládali laminární proudění s konstantním rychlostním profilem v celém měřícím průřezu čidla a bodové elektrody. Předchozí měření nám ukazují, že v každém praktickém případě musíme počítat s nerovnoměrným rychlostním profilem. Pokusme se nyní si udělat představu, jaká bude odezva napětí na bodových měřících elektrodách v případě nerovnoměrného proudění.

Jak již bylo dříve řečeno, elektromagnetický průtokoměr sleduje rychlostní profil pouze v jedné rovině, která je určena spojnici elektrod a axiální osy čidla [1]. Pro zjednodušení následujících úvah budeme předpokládat, že magnetické pole bude v měřícím profilu homogenní s konstantní indukcí $\mathbf{B}$. Pokud vyjdeme z toho, že rychlost každé proudnice je závislá na její vzdálenosti od axiální osy ($\mathbf{v} = f(l)$), dostaneme poměrně přesný popis dějů uvnitř průtokoměru [1].

Elektrody elektromagnetického průtokoměru můžeme považovat za bodové. To znamená, že plocha elektrod se v tomto případě neuplatní. Nejkratší spojnice l mezi elektrodami určuje výstupní napětí odvozené od průtoku kapaliny. Předpokládejme v této úvaze, že vektor magnetické indukce je kolmý na rovinu, která je tvořena vektorem rychlosti a spojnici mezi elektrodami l . Z hlediska teorie obvodů je možné zdroj napětí pohybové složky u_p rozložit na sériové spojení nekonečně mnoha dílčích zdrojů napětí u_{pi} (s vlastním sériovým odporem R_{iki}) [1], které popisují napětí vyvolané proudnicemi se stejnou rychlostí a určitém úseku. Velikost dílčího napětí můžeme přibližně definovat podle vztahu (5.1).

$$u_p = \sum_{i=1}^{\infty} u_{pi} = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbf{B} \Delta l_i \mathbf{v}_i = \mathbf{B} \sum_{i=1}^{\infty} \Delta l_i \mathbf{v}_i = \mathbf{B} / \mathbf{v}_s \quad (5.1)$$

$$R_{ik} = \sum_{i=1}^{\infty} R_{iki}$$

Uvedené úvahy naznačují, že výsledné napětí mezi elektrodami bude úměrné součtu jednotlivých dílčích součinů rychlostí od jednotlivých proudnic a délkových elementů. To znamená, že toto napětí bude úměrné střední rychlosti v_s všech proudnic v měřící polorovině [1].

Za předpokladu, že rychlostní ekvilinie budou soustředné kružnice se středem ležícím na axiální ose průtokoměru, bude výstupní napětí na elektrodách odpovídat reálnému průtoku. Tento závěr odpovídá i praktickým poznatkům [1].

Jak je z provedeného experimentu patrné, musí se počítat s tím, že není možné určit správnou hodnotu průtoku, pokud umístíme průtokoměr do potrubí nevhodně oproti zásadám správné instalace, to je v blízkosti ohybů potrubí nebo náhlých přechodů potrubí, které způsobují odtrhávání proudnic a vznik vírů a ostatních hydrodynamických poruch. Velikost a polarita chyby je pak závislá i na natočení osy elektrod k rovině ohybu potrubí, případně poruchy.

Konstrukční uspořádání elektromagnetického indukčního průtokoměru (dvoelektrodový systém) umožňuje měřit pouze průtoky s rotačním rychlostním profilem. Všechny proudnice musí být orientovány v jednom směru a v žádném případě by nemělo docházet k jejich odtrhávání [1].

5.4. Měření průtoku pomocí škrcení toku

Mezi další způsob měření patří měření průtoku pomocí škrcení toku. Tento způsob je vhodný všude tam, kde nevadí větší tlaková ztráta. Pro použití této metody jsou výhodné indukční průtokoměry, protože nemají žádné pohyblivé díly a měřící průřez je čistě kruhový.

Hlavní princip spočívá v tom, že měřenou kapalinu před měřícím místem zaškrtneme kruhovou clonou. Tím získáme první výhodu, kterou je zrychlení toku v čidle. Vyšší průtok už sám o sobě zvýší přesnost měření. V praxi je možné nasadit za clonu průtokoměr s nižší světlostí, který bude pracovat s vyšším průtokem.

Další přednosti zaškrtnutého toku jsou následující:

- Rychlostní profil v hrdle škrtící clony se tvarem blíží k profilu ideální tekutiny, což umožňuje zjednodušit celkovou analýzu dané problematiky. Zkoušky ukázaly, že seškrcením průtoku se výrazně potlačují účinky tření o stěny potrubí tak, že je možné je v dalších úvahách zanedbat.
- Zúžením toku rovněž omezujeme turbulenci, to znamená, že zhuštěním proudnic se zabraňuje jejich odtrhávání a lokální vektory rychlosti mají stejnou orientaci [1].
- Ve vztahu pro přepočítání z většího průměru na menší se všechny hodnoty při měření objemového a hmotnostního průtoku nacházejí pod odmocninou. Potom chyba na těchto hodnotách je prakticky poloviční v porovnání s průtokoměrem bez škrtící clony [1].

Některé přednosti této metody jsou pro určité praktické případy zároveň nevýhodou. Zařazení škrtící clony do potrubí a přechod na menší průměr komplikuje konstrukci měřícího úseku a je výrobně náročnější. Škrtící clona je náchylnější k tvorbě usazenin. Škrcení můžeme použít jedině tam, kde nevadí zvýšená tlaková ztráta způsobená clonou. Výhody dané škrtící clonou je možné uplatnit jen v určitém rychlostním rozsahu, který je rozhodně menší než měřící rozsah samotného indukčního průtokoměru. [1]

Při tomto způsobu měření není clona vsouvána přímo před průtokoměr jako při

prováděných experimentech. Mezi clonou a průtokoměrem je umístěn kuželový konfuzor a většinou i přímý úsek, které by neměly výrazně ovlivňovat symetrii rychlostního profilu (viz obr.3.4).

6. Bezprostředně vyplývající doporučení z provedeného měření

Při sběru informací o správné instalaci indukčních průtokoměrů jsem dospěla k těmto závěrům:

1. Výběr místa instalace

Indukční průtokoměry jsou určeny pro vnitřní prostory objektů s prostředím obyčejným a aktivním horkým s následujícími parametry podle ČSN 330300:

Rozsah provozních teplot: 5 – 55 °C

Relativní vlhkost vzduchu: maximálně 90%

Atmosférický tlak: 66 – 106 kPa

Výrobce nedoporučuje umísťovat průtokoměr v blízkosti tepelných zářičů nebo v místech, kde může teplota klesnout pod 0 °C. Optimální okolní teplota je v rozmezí 15 až 30 °C. Průtokoměr neumísťujeme tam, kde by mohla při poruše potrubí kapat voda nebo kde by byl ohrožen mechanickým poškozením.

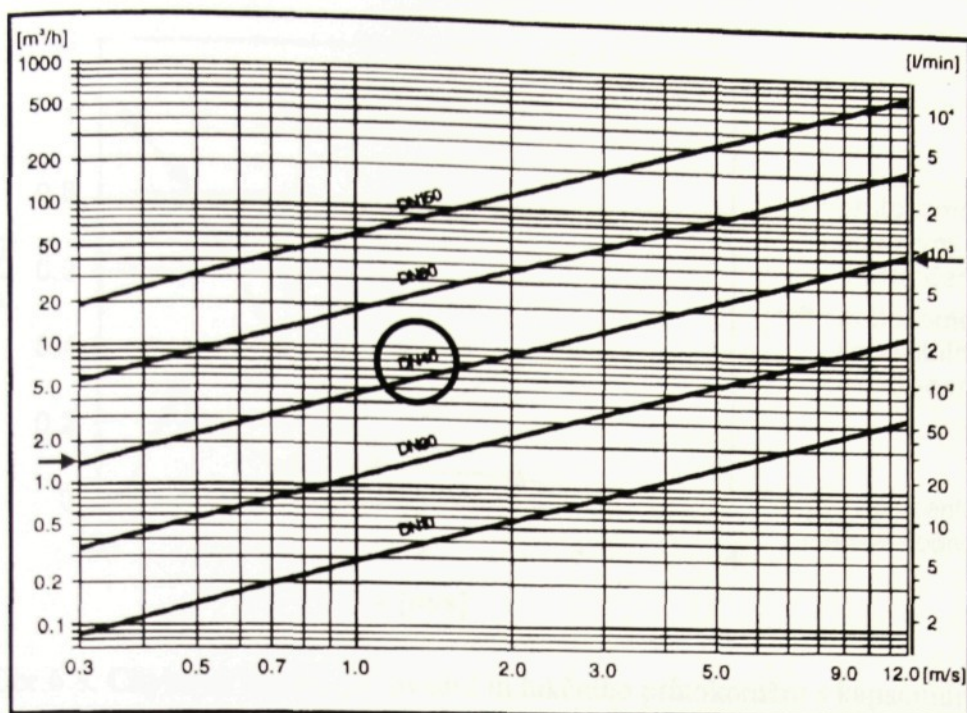
Osvětlení není nutné, protože displej je čitelný i v úplné tmě. Výrobce doporučuje, aby displej nebyl vystaven přímému slunečnímu světlu.

2. Zajištění optimální rychlosti kapaliny v měřicí trubici

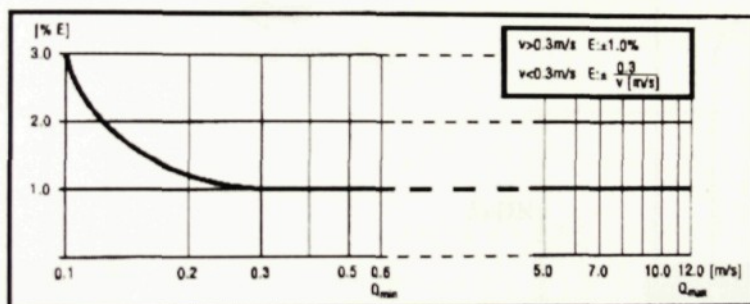
Pro využití rozsahu měření volíme maximální rychlost co největší avšak tak, aby nepřesáhla 12 m/s. Nejrychleji zjistíme rychlost z maximálního průtoku v m³/h pomocí nomogramu na obr.6.1. V diagramu je možno pro daný průtok vyčíst rychlost média v průtokoměru. Světlost průtokoměru zvolíme takovou, aby při předpokládaném maximálním průtoku, který chceme měřit, byla rychlost v průtokoměru v rozmezí 3 až 12 m/s [2]. Tím nejlépe využijeme měřicí rozsah a přesnost průtokoměru. Je-li rychlost nedostatečná, zvolíme menší DN tak, aby se rychlost blížila 9 m/s. Pokud tlaková ztráta není velká, můžeme zvolit ještě menší DN tak, aby se rychlost blížila 12 m/s. Zpravidla vychází potřebná světlost průtokoměru menší než světlost potrubí a je nutné použít redukční kužely (viz. Kap.3.2.2). Pokud jsou umístěny v blízkosti průtokoměru, musí být jejich vrcholový úhel $\alpha \leq 20^\circ$, přičemž pro redukční kužel před průtokoměrem (konfuzor) je úhel $\alpha = 20^\circ$ optimální [2]. S ohledem na to, aby délka redukovaného úseku byla co nejkratší, používá se úhel $\alpha = 20^\circ$ i pro redukční kužel za průtokoměrem (difuzor). Prodloužením délky difuzoru ($\alpha = 8 - 16^\circ$) lze tlakové ztráty vznikající v systému podstatně snížit (viz. Kap.3.2.2).

Na obrázku 6.2 je znázorněna typická chybová křivka [2] průtokoměru, která nám říká, že:

- měřicí rozsah průtokoměru je v rozmezí 0,1 – 12 m/s
- oblast schválená v typovém osvědčení TCS 311/92 – 1482 má rozpětí od 0,3 do 12 m/s
- a oblast doporučená výrobcem je 0,5 – 9 m/s

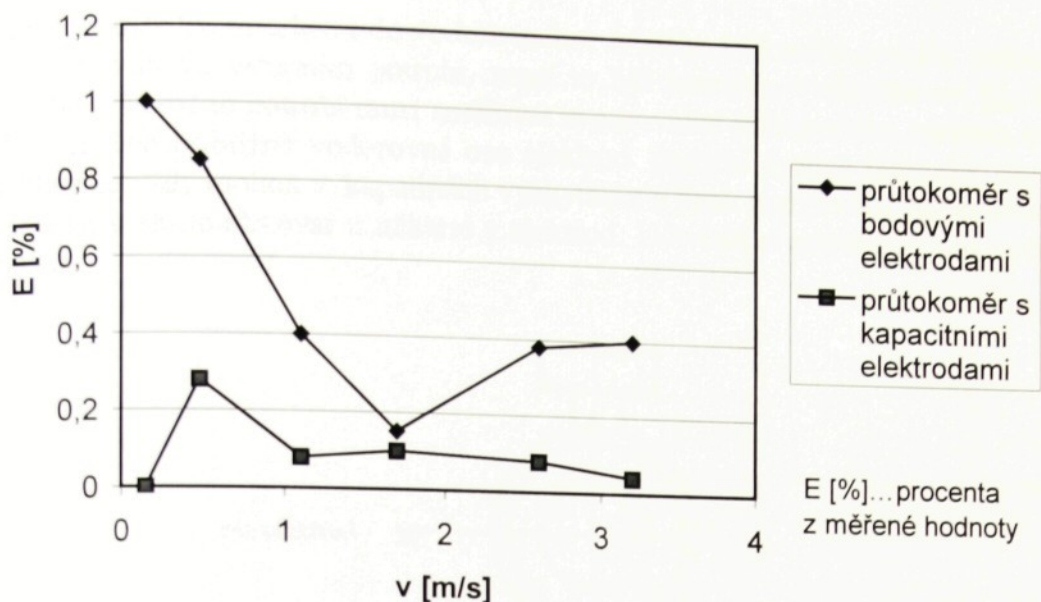


Obr.6.1. Nomogram pro volbu jmenovité světlosti průtokoměru

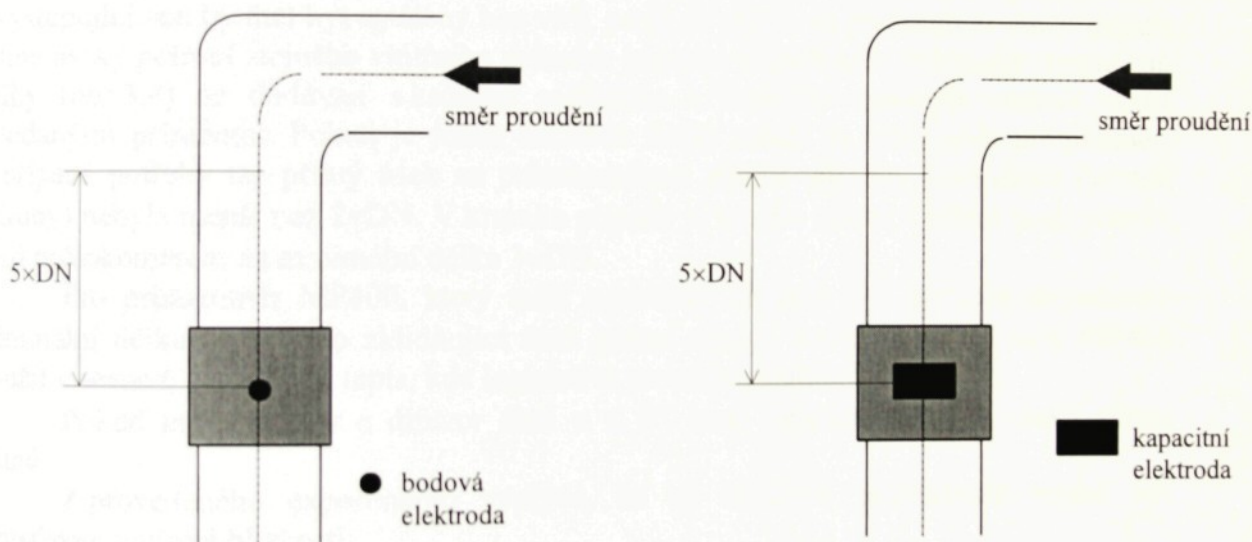


Obr.6.2. Typická chybová křivka průtokoměru

Poznámka: Literatura firmy KROHNE [7] uvádí srovnání přesnosti měření běžného indukčního průtokoměru s bodovými elektrodami a svého výrobku, magneticko-indukčního průtokoměru s kapacitními elektrodami (CAPAFLUX IFM 5080 K-CAP). Měření bylo provedeno na průtokoměru DN80, umístěném za pravoúhlým kolenem, uklidňovací délka byla $5 \times DN (=400\text{mm})$ od kolena k rovině elektrod (Obr.6.4). Na základě tohoto měření uvádí firma KROHNE následující graf (Obr.6.3).



Obr.6.3. Chybová křivka, porovnání indukčního průtokoměru s kapacitními elektrodami a indukčního průtokoměru s bodovými elektrodami



Obr.6.4. Umístění průtokoměrů při měření

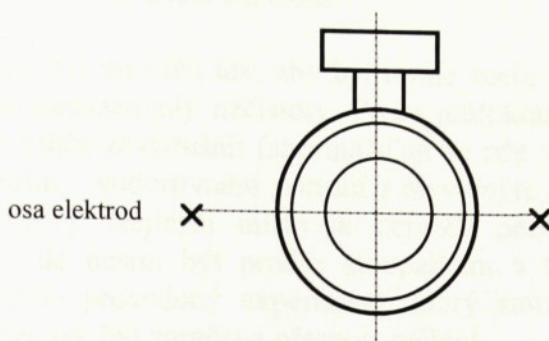
Popis měřícího principu průtokoměru s kapacitními elektrodami:

Měřená hodnota je snímána bezkontaktně pomocí kapacitních elektrod. Kapacitní elektrody, umístěné po obou stranách měřící trubice, tvoří spolu s měřenou kapalinou kondenzátor, dielektrikem je keramická měřící trubice. Rušivé signály jsou potlačeny pomocí vysokopásmových filtrů a předzesilovače, které jsou umístěny přímo na měřící trubici [7].

Narozdíl od indukčního průtokoměru s bodovými elektrodami nejsou kapacitní elektrody v přímém styku s měřenou kapalinou.

3. Doporučení pro instalaci

Průtokoměr lze instalovat do vodorovného, svislého i šikmého potrubí, pokud však má být instalován ve vstupním potrubí, musí to být uvedeno v objednávce [2, 10]. U vodorovného a šikmého potrubí musí směřovat svorkovnice průtokoměru směrem vzhůru, aby byla zajištěna přibližně vodorovná osa elektrod, protože drobné bublinky stoupající vzhůru, které se vždy mohou v kapalinách vyskytnout a jinak neovlivňují přesnost měření, se tak nemohou shromažďovat u některé z elektrod. U svislého potrubí je tato podmínka splněna vždy.



Obr.6.5. Umístění osy elektrod

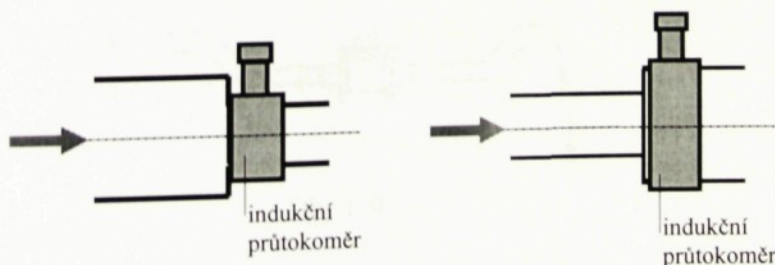
Jak bylo ověřeno v experimentální části, proud kapaliny vstupující do průtokoměru a vystupující ven by měl být ustálený bez vírů, proto se před a za průtokoměr musí zařadit přímé úseky potrubí stejného vnitřního průměru jako má průtokoměr. Nátrubky dostatečné délky (obr.3.4) se dodávají s každým měřidlem a musí se dokonale souose svařit s dodanými přírubami. Pokud je jeden nátrubek delší, zařadí se vždy před průtokoměr. V případě potřeby lze přímý úsek za průtokoměrem zkrátit tak, aby jeho délka (včetně příruby) nebyla menší než $2 \times DN$. V krajním případě je možno zkrátit i přímý úsek potrubí před průtokoměrem na minimální délku $3 \times DN$.

Pro průtokoměr MP400, který měří s relativní chybou 1%, výrobce doporučuje minimální délku $5 \times DN$ pro zklidňující úsek pokud možno dodržet (pokud není MP400 použit v sestavě pro měření tepla, kde legislativa povoluje relativní chybu 3%).

Pokud má konfuzor a difuzor úhel $\alpha \leq 8^\circ$, není zařazení přímých úseků vůbec nutné.

Z provedeného experimentu vyplývá, že by indukční průtokoměr neměl být umístován v přímé blízkosti:

- oblouků a kolen natočených v různých rovinách vůči ose elektrod indukčního průtokoměru (obr.4.8 a 4.9),
- náhlých přechodů potrubí, a to nejen na menší, ale také na větší průměr (obr.6.6),



Obr.6.6. Špatné umístění indukčního průtokoměru v těsné blízkosti náhlých přechodů

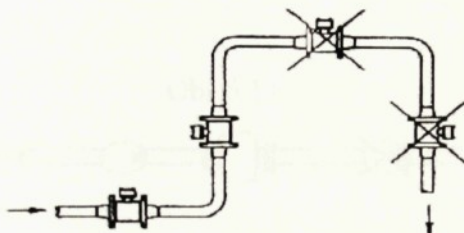
- regulačních ventilů, které slouží k usměrňování průtočného množství,

- míst, která zasahují do proudění, to jsou především místa s vnitřními švy po svařování, místa, kde dochází k usazování nečistot a kotelního kamene,
- špatně vystředěných těsnění, která mohou způsobit situaci simulovanou použitím clon s vyoseným otvorem v polohách podle obr.4.7a,b,c.

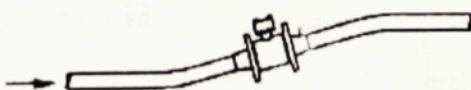
Jako rušivé prvky nepůsobí:

- kuželové konfuzory s vrcholovým úhlem menším než 20° .
- šoupátka a kulové kohouty, pokud zabezpečíme (plombou, zámkem,...), že budou při měření stále zcela otevřené.

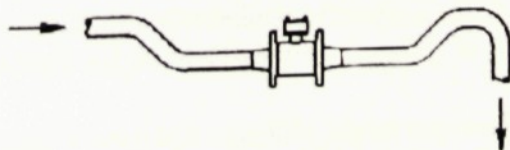
Průtokoměr musí být umístěn tak, aby byl trvale zcela zaplněn médiem a zároveň také tak, aby se v něm neusazovaly nečistoty. Proto průtokoměr nesmí být v nejvyšším místě potrubí, které se může zavzdušnit (shromažďují se zde vzduchové bubliny - chyba měření) nebo v klesajícím i vodorovném potrubí s otevřeným koncem, do kterého může vniknout vzduch (obr.6.7). Nejlepší místo je nejnižší nebo stoupající úsek potrubí (obr.6.7,6.8,6.9), který ale nesmí být prudce stoupajícím v těsné blízkosti indukčního průtokoměru, jak ukazuje provedený experiment, který simuloval proudění přímo za ohybem potrubí. Nemůže tak být zaručena přesnost měření.



Obr.6.7.



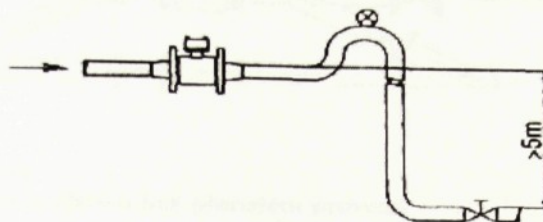
Obr.6.8.



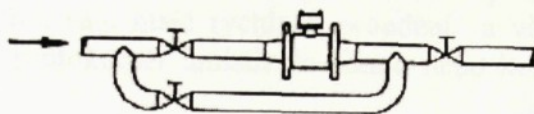
Obr.6.9.

Obr.6.9 nám znázorňuje volný vtok nebo výtok, v tomto případě je vhodné snímač umístit do sifonu (pozor na dodržení uklidňovacích délek, průtokoměr umístěný přímo za ohybem potrubí sifonu nemůže zaručit přesné měření, jak bylo experimentálně zjištěno). V místě instalace průtokoměru musí být dostatečný tlak, aby se tam z kapalin nevylučovaly bubliny páry nebo plynů. Na obr.6.10 je klesající úsek potrubí delší než 5 metrů, váha

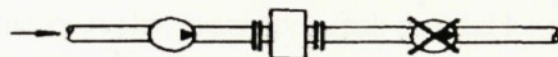
sloupce vody by způsobila (při dostatečně otevřeném ventilu), že tlak v průtokoměru by byl menší než atmosférický. Proto je tam v nejvyšší části potrubí umístěn za snímačem odvzdušňovací ventil. Pro horkou vodu nebo jinou kapalinu může být kritická délka svislého (tzv. gravitačního) úseku menší.



Obr. 6.10.



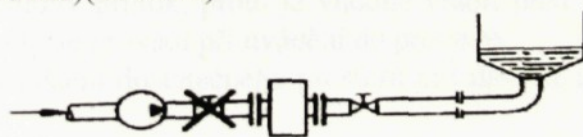
Obr. 6.11.



Obr. 6.12.

Bublanky plynu se vylučují z kapalin při náhlém poklesu tlaku. Proto by regulační škrtkové ventily a podobné prvky měly být umístěny za průtokoměrem. Z téhož důvodu nemá být průtokoměr na sací straně čerpadla, protože způsobuje podtlak (obr. 6.12).

Pokud je průtokoměr v dlouhém potrubí, pak je nutno umístit regulační a uzavírací armatury vždy za něj (podtlak) (obr. 6.13).

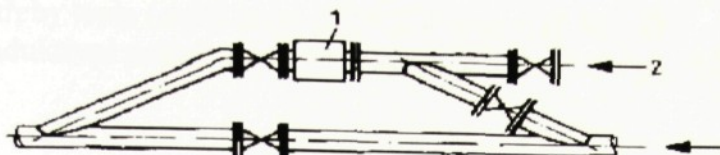


Obr. 6.13.

Měřená kapalina by měla protékat snímačem průtoku směrem, který je na něm označen šipkou. Obrácený průtok standardně provedené přístroje neměří.

Pokud je potřeba měřit průtok silně znečištěných kapalin, je nutné umístit průtokoměr do obtoku podle obr. 6.14.

Elektrody průtokoměru musí být neustále zaplaveny měřenou kapalinou i v případě, že potrubní systém je eventuálně vyprázdněn. To platí při uspořádání podle obr. 6.9. Předjde se tím zaschnutí nečistot a usazenin na elektrodách nebo v měřicí trubici. Při následném zaplnění by mohlo dojít k situacím simulovaným v měřeních prováděných na školní lince (Příloha 2, Tab. 1 - 13) a tím k chybám v měření indukčního průtokoměru.



1 Průtokoměr
2 Vypouštění a čištění bez přerušení provozu

Obr.6.14.

Jelikož je měřicí trubice zcela hladká, a pokud je rychlost kapaliny dostatečná, nemají se nečistoty kde zachytit. Při trvale malé rychlosti proudění a větším výskytu specificky těžších nečistot je dobré průtokoměr umístit do šikmo nebo kolmo stoupajícího potrubí podle obr.6.7 nebo 6.8.

Neméně důležitá jsou i tato další doporučení:

- Použité potrubí by mělo být hladké nebo jen minimálně drsné na délce přibližně 10DN.
- V žádném případě by nemělo docházet k odtržení proudnic, proto by neměly být na vnitřních stěnách žádné výstupky, svary apod.(pak dochází k nepřesnostem měření jako v provedených experimentech).
- Potrubí je nutno před a za snímačem uchytit, aby se zabránilo vibracím.
- V blízkosti snímače se nesmějí nacházet silná elektromagnetická pole.
- Při směšování různých látek umístíme snímač před místo mísení nebo v dostatečné vzdálenosti za ním (minimálně 30xDN), jinak může být měření nestabilní.
- V případě vířivého a neustáleného proudění se musí zajistit větší uklidňovací délky nátoky a odtoku nebo vložit usměrňovače proudění.
- Nastavení nuly sice není nutno běžně provádět, ale při kontrole se musí zajistit zcela zaplněné potrubí a nulový průtok, proto je vhodné vřadit před a za snímač uzavírací armaturu. Kontrola nuly se provádí při uvádění do provozu.
- Neméně důležité je zajištění dostatečného prostoru pro montáž a údržbu kolem přírub potrubí.

7. Porovnání základních technických parametrů indukčních průtokoměrů vyráběných společností EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou

Při výběru vhodného průměru indukčního průtokoměru pro měření jsem byla nucena nahlédnout do firemních katalogových listů, výrobní dokumentace a zkušebních protokolů společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou. Výsledkem se stal přehled naznačený v tabulce 7.1. Při studiu těchto parametrů ve více katalogích docházelo k nejasnostem. Například pro průtokoměr řady MP400 jsou uváděny odlišné hodnoty maximálního a minimálního průtoku. Z těchto hodnot sice vyplývá, že se tu setkáváme s novým zlepšením výrobků řady MP400, ale která řada je novější, se můžeme dohadovat jen podle hodnot uvedených v řadě vyšší. Další nejasnosti se týkají

dovolených chyb přesnosti., kde se liší opět řada MP400 od výrobních řad MT200 a MT500.U řady MT500 je uvedena jen třída přesnosti 4 podle OIML R75, bez uvedení povolené hodnoty.

Význam použitých zkratk:

MT...měřič spotřeby tepla (starší verze je MT200 a novější MT500)
MP...magnetoinдуктивní průtokoměr (starší verze je MP400/1 a novější MP400/2)

Základní parametry		Řada			
		MT200	MP400/1	MP400/2	MT500
Jmenovitá světlost DN [mm]		10	10	10	10
		20	20	20	20
		40	40	40	40
		80	80	80	80
		150	150	150	150
					300
Minimální průtok $Q_{min}[m^3/h]$	DN10	0,085	0,085	0,17	0,17
	DN20	0,339	0,339	0,68	0,68
	DN40	1,356	1,356	2,71	2,71
	DN80	5,426	5,426	10,85	10,85
	DN150	19,075	19,075	38,15	38,15
	DN300				76,3
Maximální průtok $Q_{max}[m^3/h]$	DN10	3,39	3,39	3,39	3,39
	DN20	13,56	13,56	13,56	13,56
	DN40	54,26	54,26	45,26	45,26
	DN80	217,04	217,04	217,04	217,04
	DN150	763,02	763,02	763,02	763,02
	DN300				3052,1
Maximální teplota média v závislosti na materiálu výstelky měřicí trubice[°C]	Polypropylen	95	95	95	95
	Teflon (PTFE)	180	180	150	150
	Korund (Al_2O_3)		180	150	150
Dovolené chyby pro třídu přesnosti $Q_{min} - Q_{max} [%]$	Pro polypropylen a teflon (PTFE):				
	$Q_{min} - 0,2 Q_{max}$			< ± 2	
	$Q_{min} - 0,2 Q_{max}$			< ± 2	
	Pro korund (Al_2O_3):				
	$0,2Q_{max} - Q_{max}$			< ± 2	
	$0,2Q_{max} - Q_{max}$			< ± 1	
		± 3	< ± 1		4 podle OIML R75
Provozní teplota [°C]		15 - 35			15 - 35
Teplota okolí [°C]		5 - 55	3 - 50	3 - 50	5 - 55

Tab.7.1. Přehled vyráběných řad indukčních průtokoměrů

Pokud se tyto materiály dostanou do rukou hloubavému spotřebiteli, co asi může vzniknout? Při porovnání maximálních průtoků řad MP400 zjistí, že zůstaly nezměněny kromě snížení maximálního objemového průtoku u světlosti DN40 o 9 [m³/h], naopak u minimálních průtoků došlo ke zvýšení hranice všech hodnot, a to dvakrát. Při srovnání dovolených chyb pro MP400/1 byla dovolena chyba $< \pm 1\%$ a u novější řady MP400/2 je dovolena chyba větší. Přitom by na větším minimálním měřitelném průtoku mělo být logicky dosaženo přesnosti měření vyšší. Z jakého důvodu došlo k povolení větší chyby? Byla tato společnost vůbec schopna splnit požadavky dané metrologickými předpisy? Když se snížila hranice přesnosti, co mě přinutí koupit si zrovna tento výrobek? Plynou z toho nějaké výhody, jako např. prodloužení životnosti výrobků této firmy...?

Příjemnou službou pro zákazníky je zajištění prvotního i následného ověření všech průtokoměrů a měřičů tepla.

Závěrem této kapitoly bych chtěla doporučit společnosti EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou, aby sjednotila základní parametry všech vývojových řad uváděných v katalogích, hlavně co se týče dovolených chyb měření. Dále z důvodů nepřehlednosti ohledně minimálního a maximálního průtoku řady MP400 bych doporučila opatřit katalogy datem, které nám usnadní orientaci mezi novější a starší verzí té které řady.

8. Závěr

Cílem diplomové práce bylo posouzení vlivu hydromechanických poruch při cejchování a při provozu indukčních průtokoměrů a následně návrh minimalizace těchto poruch.

Diplomová práce se skládá ze dvou částí:

- teoretické, která se zabývá teoretickým principem měření indukčních průtokoměrů a základy hydromechaniky z hlediska měření průtoku
- a experimentální, ta je zaměřena na simulaci vybraných nejčastějších hydromechanických poruch proudění na školní lince a na simulaci poruch při nedodržení předepsané vzdálenosti ventilu od indukčního průtokoměru na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o. Všechny simulace byly prováděny za statických podmínek. Dále jsou zde probrány rychlostní profily za vybranými zdroji způsobujícími tyto poruchy. Neméně důležitou částí této práce je shrnutí zásad pro správné umístění indukčních průtokoměrů do potrubí a přehled parametrů řad vyráběných indukčních průtokoměrů společnosti EESA s.r.o.

Měření bylo zaměřeno zvláště na simulaci proudění při náhlém přechodu průměru potrubí a v těsné blízkosti za ohyby potrubí umístěných v různých rovinách vůči rovině elektrod. Na základě těchto měření bylo zjištěno, že při průtoku cca 30 l/min neměří indukční průtokoměr v uvedených případech s chybou větší než 5%. Tato chyba sice nevyhovuje požadavkům přesnosti předepsaných legislativou pro měření, ale při zaručení statických podmínek, jak bylo měřením dokázáno, je možno průtokoměr překalibrovat na zjištěnou chybu.

Při simulaci poruch vznikajících u průtokoměrů, jež jsou součástí dávkovacích automatů a před nimiž bývá nesprávně umístěn ventil na regulaci průtočného množství, nám průtokoměr vykázal chybu zvyšující se se zmenšujícím průměrem otvoru ventilu a s rostoucí rychlostí tekutiny. Zjištěné chyby dosahovaly hodnot zásadně nevyhovujících požadavku předepsané přesnosti měření, zvláště při umístění vyoseného otvoru ventilu (clony) k elektrodě. Na základě výsledků měření výslovně nedoporučuji vsouvat ventily přímo před indukční průtokoměr.

Z provedených experimentů plyne, že všechny simulované poruchy proudění prokázaly vliv na přesnost měření indukčního průtokoměru. Je pravděpodobné, že s rostoucím průtokem a větší členitostí a náhlými přechody uvnitř potrubí, bude chyba měření stoupat. Proto doporučuji dobře zvážit podmínky, za kterých je možno instalovat indukční průtokoměr, a dodržet vzdálenosti předepsané výrobcem.

Jak už bylo řečeno, všechna měření byla prováděna za statických podmínek. Bohužel běžná praxe nám poskytuje více případů dynamických podmínek, proto navrhuji pro další diplomovou práci simulaci těchto poruch proudění za dynamických podmínek, které mohou být dalším přínosem pro oblast přesnosti měření indukčních průtokoměrů.

Literatura:

- [1] Richter, A. : Indukční měření průtoku kapalin, TUL FM, Liberec, habilitační práce, 1998
- [2] EESA : Firemní technická dokumentace, EESA s.r.o. Lomnice nad Popelkou
- [3] Noskievič, J. a kol.: Mechanika tekutin, SNTL/ ALFA Praha, 1987
- [4] Wagner, J. : Fyzika (Přehled pro textilní fakultu), VŠST Liberec, 1989
- [5] Čech, S. : Strojně technická příručka, díl 1., SNTL Praha, 1977
- [6] EA & KROHNE & SIGMA : Zpravodaj 1/96, Brno, 1996
- [7] KROHNE: Katalogové listy, KROHNE Wien
- [8] SIMA: Katalogové listy, SIMA s.r.o. Brno
- [9] SIGMA: Katalogové listy, SIGMA a.s. Brno
- [10] Dobiášová, J: Řízení jakosti výroby čidel indukčních průtokoměrů, DP TUL 1999
- [11] Mikulčák, J. a kolektiv: Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy, SPN Praha, 1988
- [12] Brož, J.; Roskovec, V.; Valouch, M.: Fyzikální a matematické tabulky, SNTL Praha, 1980
- [13] Mikyšková, M.: Měření průtoku škrťacími orgány, 1.díl, Dům techniky Praha, 1990

Seznam příloh:

Příloha 1: Školní měřicí linka (technický náčrtek)

Příloha 2: Měření na školní lince (Tab.1 - 13)

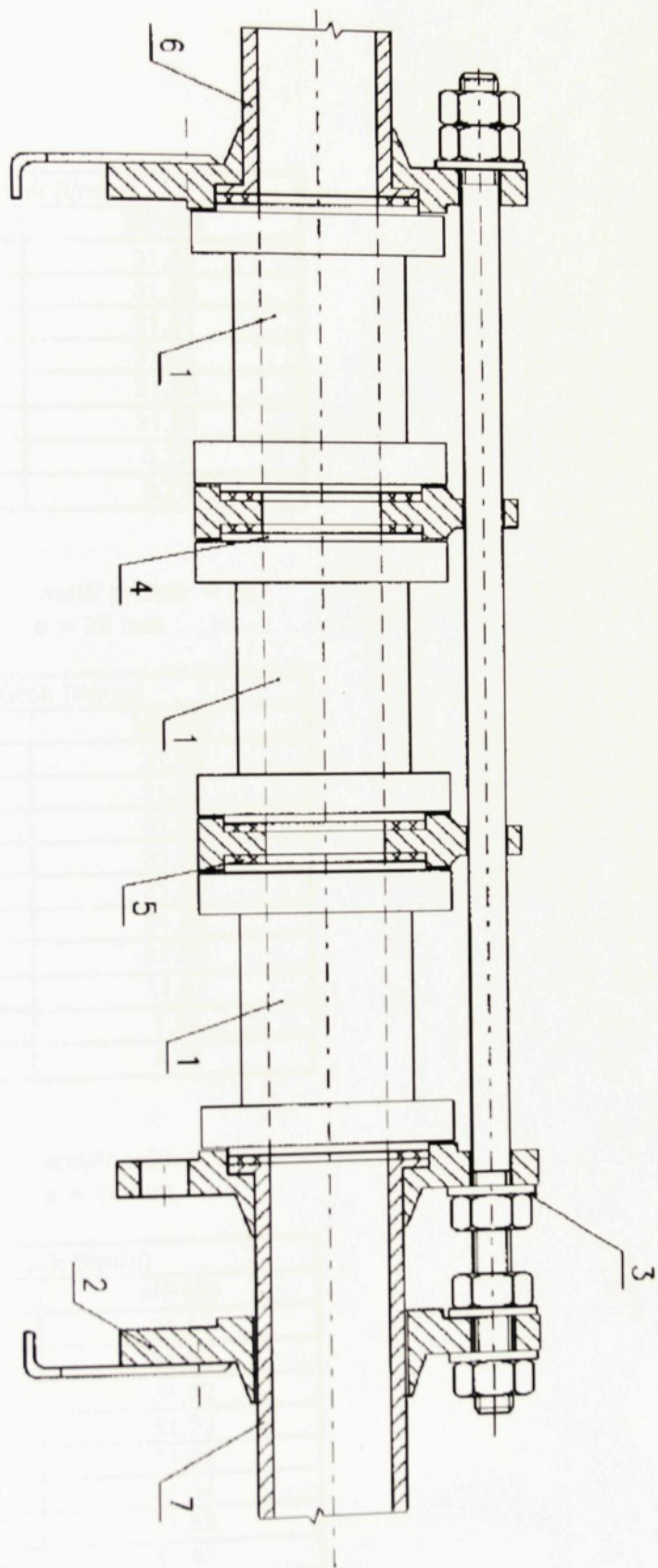
Příloha 3: Měření na školní lince (Tab.1a - 3b)

Příloha 4: Měření na cejchovací lince společnosti EESA s.r.o. (Tab. A1 - B4b)

Příloha 5: Příklady instalace indukčních průtokoměrů (fotodokumentace)

Legenda k obrázku:

- 1 indukční průtokoměr (DN40)
- 2 příruby
- 3 utahování přírub
- 4 výstupek průtokoměru
- 5 těsnění
- 6 uklidňovací délka před indukčním průtokoměrem (400mm)
- 7 uklidňovací délka za indukčním průtokoměrem (200mm)



Tab.1. Měření bez clony

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
31,77	31,38
31,81	31,68
31,79	31,61
31,66	31,62
31,80	31,39
Průměr	31,76
Rozdíl Δ [l/min]	0,23
Celková chyba E [%]	0,72

Tab.2. Clona vystředěná

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 29 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
32,75	31,68
32,76	31,66
33,08	31,66
32,99	31,59
32,85	31,56
32,77	31,56
32,76	31,56
Průměr	32,85
Rozdíl Δ [l/min]	1,24
Celková chyba E [%]	3,78

Tab.3. Clona vystředěná

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 24 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
33,08	31,57
33,32	31,62
33,07	31,82
32,92	31,59
32,53	31,62
33,40	31,54
33,31	31,82
Průměr	33,09
Rozdíl Δ [l/min]	1,43
Celková chyba E [%]	4,34

Tab.4. Clona vystředěná

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 19 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	32,95	31,55
	32,96	31,70
	32,94	31,83
	32,95	31,63
	32,94	31,49
	32,96	31,73
	32,95	31,79
Průměr	32,95	31,67
Rozdíl Δ [l/min]		1,27
Celková chyba E [%]		3,86

Tab.5. Clona vyosená od středu, otvor clony k elektrodě

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 29 mm
x = 6,5 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	33,15	31,73
	33,15	31,80
	32,75	31,61
	32,88	31,69
	33,14	31,64
	32,60	31,59
	33,22	31,59
Průměr	32,99	31,66
Rozdíl Δ [l/min]		1,32
Celková chyba E [%]		4,00

Tab.6. Clona vyosená od středu, otvor clony k cívce

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 29 mm
x = 6,5 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	32,31	31,64
	32,14	31,57
	31,75	31,74
	31,79	31,60
	32,27	31,60
	32,18	31,58
	32,34	31,57
Průměr	32,11	31,61
Rozdíl Δ [l/min]		0,49
Celková chyba E [%]		1,54

Tab.7. Clona vyosená od středu, otvor clony mezi elektrodou a cívkou

Parametry clony:

vnější průměr = 70

a = 29 mm

x = 6,5 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	32,82	31,54
	32,80	31,43
	33,14	31,47
	33,12	31,65
	32,67	31,49
	32,75	31,49
	33,14	31,49
Průměr	32,92	31,51
Rozdíl Δ [l/min]		1,41
Celková chyba E [%]		4,29

Tab.8. Clona vyosená od středu, otvor clony k elektrodě

Parametry clony:

vnější průměr = 70

a = 24 mm

x = 9 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	33,30	31,60
	32,83	31,46
	33,14	31,71
	33,31	31,62
	32,84	31,62
	32,71	31,69
	33,27	31,64
	33,18	31,61
Průměr	33,07	31,62
Rozdíl Δ [l/min]		1,45
Celková chyba E [%]		4,39

Tab.9. Clona vyosená od středu, otvor clony k cívkě

Parametry clony:

vnější průměr = 70

a = 24 mm

x = 9 mm

Průtok [l/min]		
	ETALON	MP400
	33,30	31,91
	33,54	32,22
	33,15	31,62
	33,17	31,81
	32,86	31,79
	33,39	32,14
	33,04	31,71
Průměr	33,21	31,89
Rozdíl Δ [l/min]		1,32
Celková chyba E [%]		3,98

Tab.10. Clona vyosená od středu, otvor clony mezi elektrodou a cívkou

Parametry clony: vnější průměr = 70
a = 24 mm
x = 9 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
33,51	31,20
33,04	31,98
33,17	32,12
33,20	31,95
33,38	32,10
33,04	30,60
33,04	32,25
Průměr	33,20
Rozdíl Δ [l/min]	1,45
Celková chyba E [%]	4,38

Tab.11. Clona vyosená od středu, otvor clony k elektrodě

Parametry clony: vnější průměr = 70
a = 19 mm
x = 11,5 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
33,30	31,72
32,75	31,51
33,30	31,51
32,60	31,49
33,07	31,54
33,24	31,69
33,22	31,64
Průměr	33,07
Rozdíl Δ [l/min]	1,48
Celková chyba E [%]	4,48

Tab.12. Clona vyosená od středu, otvor clony k cívce

Parametry clony: vnější průměr = 70
a = 19 mm
x = 11,5 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
32,75	31,52
33,30	31,62
33,23	31,57
33,22	31,73
32,83	31,62
33,30	31,67
32,71	31,67
Průměr	33,05
Rozdíl Δ [l/min]	1,42
Celková chyba E [%]	4,30

Tab.13. Clona vyosená od středu, otvor clony mezi elektrodou a cívkou

Parametry clony: vnější průměr = 70
a = 19 mm
x = 11,5 mm

Průtok [l/min]	
ETALON	MP400
33,22	31,54
32,79	31,57
33,14	31,61
32,77	31,75
33,22	31,70
32,94	31,70
33,30	31,56
Průměr	33,05
Rozdíl Δ [l/min]	1,42
Celková chyba E [%]	4,30

MP400 DN40

v.č. 00126/98

Tab.1a. Měření bez clony

Průtok [l/min]	
ETALON	Překalibrovaný MP400
31,80	32,88
31,66	33,19
31,77	33,12
31,79	33,13
31,81	32,89
Průměr 31,76	33,04
Rozdíl Δ [l/min]	1,28
Celková chyba E [%]	4,02

Tab.1b. Clona vystředěná

Parametry clony:

vnější průměr = 70
a = 24 mm

Průtok [l/min]		Rozdíl od etalonu	Chyba MP400 [%]
ETALON	Překalibrovaný MP400		
33,54	33,21	0,33	0,98
33,35	33,09	0,26	0,79
33,30	33,09	0,21	0,63
33,14	32,96	0,18	0,55
33,50	33,23	0,27	0,79
33,27	32,94	0,33	0,98
33,15	32,96	0,19	0,58
Průměr 33,32	33,07		
Rozdíl Δ [l/min]	0,25		
Celková chyba E [%]	0,76		

Tab.2a. Měření bez clony

Průtok [l/min]	
ETALON	Překalibrovaný MP400
31,67	33,21
31,68	32,92
31,65	33,18
31,69	33,13
31,67	32,87
Průměr 31,67	33,06
Rozdíl Δ [l/min]	1,39
Celková chyba E [%]	4,40

Tab.2b. Clona vyosená od středu, otvor clony k elektrodě

Parametry clony:

vnější průměr = 70

a = 19 mm

x = 11,5 mm

Průtok [l/min]		Rozdíl od etalonu	Chyba MP400 [%]
ETALON	Překalibrovaný MP400		
33,34	33,52	-0,18	-0,54
32,90	33,18	-0,28	-0,85
33,06	33,29	-0,23	-0,69
32,54	32,86	-0,32	-0,98
32,45	32,74	-0,29	-0,90
33,31	33,47	-0,16	-0,49
32,66	32,98	-0,32	-0,97
Průměr	32,90	33,15	
Rozdíl Δ [l/min]		0,25	
Celková chyba E [%]		0,77	

Tab.3a. Měření bez clony

Průtok [l/min]	
ETALON	Překalibrovaný MP400
31,79	32,87
31,80	33,21
31,77	32,92
31,81	33,13
31,79	33,18
Průměr	31,79
Rozdíl Δ [l/min]	33,06
Celková chyba E [%]	1,27
	4,00

Tab.3b. Clona vyosená od středu, otvor clony k cívce

Parametry clony:

vnější průměr = 70

a = 19 mm

x = 11,5 mm

Průtok [l/min]		Rozdíl od etalonu	Chyba MP400 [%]
ETALON	Překalibrovaný MP400		
32,93	32,87	0,06	0,17
33,50	32,98	0,53	1,57
32,61	32,93	-0,31	-0,97
33,47	33,21	0,26	0,79
33,46	33,26	0,20	0,59
32,55	32,82	-0,27	-0,83
33,15	33,03	0,12	0,37
Průměr	33,10	33,01	
Rozdíl Δ [l/min]		0,08	
Celková chyba E [%]		0,25	

MP400 DN40 v.č. 00198/97

nižší průtok

cca 30 l/min
(30-32 l/min)

vyšší průtok

cca 500 l/min
(500-510,9 l/min)

1. Měření bez clony

nižší průtok

Tab.A1

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,01	30,01	-0,01
32,00	32,10	-0,10
30,00	30,08	-0,08
30,00	30,01	-0,01
30,00	30,01	-0,01
30,00	30,01	-0,01
Celková chyba		0,04

vyšší průtok

Tab.B1

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
500,20	500,20	0,00
511,00	511,20	-0,20
510,90	510,11	0,79
510,00	510,20	-0,20
510,00	510,00	0,00
510,00	510,10	-0,10
Celková chyba		0,05

2. Clona vyosená od středu

Parametry clony: vnější průměr = 65mm

a = 15mm

b = 10mm

x = 5mm

y = 5mm

nižší průtok

Tab.A2a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,01	33,80	-3,79
30,02	33,80	-3,78
30,02	32,30	-2,29
30,02	33,90	-3,88
30,01	33,80	-3,79
30,01	33,90	-3,89
Celková chyba		3,57

vyšší průtok

Tab.B2a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,00	516,00	-6,00
510,50	515,00	-4,50
510,60	517,80	-7,20
510,00	518,20	-8,20
510,00	518,30	-8,30
510,00	518,10	-8,10
Celková chyba		7,05

nižší průtok

Tab.A2b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,02	32,30	-2,28
30,02	32,10	-2,08
30,02	32,10	-2,09
30,01	32,10	-2,09
30,01	32,20	-2,19
30,01	32,10	-2,09
Celková chyba		2,14

vyšší průtok

Tab.B2b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,00	513,00	-3,00
510,50	513,12	-2,62
510,60	513,80	-3,20
510,50	513,40	-2,90
510,50	513,20	-2,70
510,50	513,10	-2,60
Celková chyba		2,84

3. Clona vyosená od středu

Parametry clony: vnější průměr = 65 mm
 $a = 10\text{ mm}$
 $b = 5\text{ mm}$
 $x = 5\text{ mm}$
 $y = 5\text{ mm}$

nižší průtok

Tab.A3a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,01	38,00	-7,99
30,02	37,60	-7,58
30,02	37,50	-7,49
30,02	36,80	-6,78
30,01	37,20	-7,19
30,01	37,30	-7,29
Celková chyba		7,39

vyšší průtok

Tab.B3a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,00	521,00	-11,00
510,00	523,00	-13,00
510,00	526,00	-16,00
510,00	531,00	-21,00
510,00	526,00	-16,00
510,00	524,00	-14,00
Celková chyba		15,17

nižší průtok

Tab.A3b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,00	33,00	-3,00
30,00	35,00	-5,00
30,02	34,00	-3,99
30,00	34,80	-4,80
30,01	34,80	-4,79
30,01	34,70	-4,69
Celková chyba		4,38

vyšší průtok

Tab.B3b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,60	518,00	-7,40
510,50	518,00	-7,50
510,60	519,00	-8,40
510,50	521,00	-10,50
510,50	521,80	-11,30
510,50	521,80	-11,30
Celková chyba		9,40

4. Clona vyosená od středu

Parametry clony: vnější průměr = 65 mm
 $a = 5\text{ mm}$
 $b = 2,5\text{ mm}$
 $x = 5\text{ mm}$
 $y = 5\text{ mm}$

nižší průtok

Tab.A4a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,00	42,00	-12,00
30,00	43,00	-13,00
30,00	42,80	-12,80
30,00	42,60	-12,60
30,00	42,80	-12,80
30,01	43,00	-12,99
Celková chyba		12,70

vyšší průtok

Tab.B4a - Otvor clony k elektrodě

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,00	533,00	-23,00
510,00	536,00	-26,00
510,00	535,00	-25,00
510,00	536,00	-26,00
510,00	534,20	-24,20
510,00	535,80	-25,80
Celková chyba		25,00

nižší průtok

Tab.A4b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
30,02	35,00	-4,99
30,02	36,00	-5,99
30,02	36,00	-5,99
30,00	36,20	-6,20
30,01	36,40	-6,39
30,01	36,00	-5,99
Celková chyba		5,92

vyšší průtok

Tab.B4b - Otvor clony k cívce

Průtok l/min		Chyba %
ETALON	MP 400	
510,10	527,70	-17,60
510,50	522,00	-11,50
510,40	523,40	-13,00
510,20	522,10	-11,90
510,30	523,40	-13,10
510,50	528,00	-17,50
Celková chyba		14,10

Příloha 5

Příklady instalace indukčních průtokoměrů (fotodokumentace)

