

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Indukční průtokoměry

**vedoucí práce: Doc. Ing. Vlastimil Beran, CSc.
autor: Vojtěch Maňas**

2011

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch MAŇAS**
Osobní číslo: **E09B0153P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Indukční průtokoměry**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte principy obecně pro měření průtoku používané, v závěru možnosti indukčních (magnetických) průtokoměrů.
2. Popište principy stejnosměrného a střídavého průtokoměr včetně možnosti rozlišení směru proudu.
3. Popište vliv na nejistoty měření - nečistotou elektrod - vlastnostmi proudícího média.
4. Uveďte možnosti kompenzace vlivu měrného odporu média, tvorby plynových kapes a zásady správné montáže.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. The Flow and Level, Measurement Handbook - Encyclopedia
OMEGA Complete Flow and Level Measurement Handbook
firemní literatura Omega, svazek 28
2. Přednášky KET/MNV
3. Nabídkové katalogy firem (z Internetu)

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Vlastimil Beran, CSc.
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: 18. října 2010
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2011


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na přehled možností měření průtoku. Hlavní náplní jsou indukční průtokoměry, kde je popisována problematika snímání měřeného média a její kompenzace. V závěru práce je popsána správná instalace indukčního průtokoměru do potrubí.

Klíčová slova

měření průtoku, senzory průtoku, indukční průtokoměr, tvorba plynových kapes, kompenzace nejistot měření, instalace průtokoměru

Abstract

Magnetic flowmeters

This bachelor thesis is focused on review of options for possibility of flow. Main fill are induction flowmeters, where are described issues of scanning measured media and its compensation. In conclusion of thesis is described correct installation of induction flowmeter into the pipeline.

Key words

flow Measurement, flow sensors, induction flowmeter, creation of gas pockets, compensation of measurement uncertainties, flowmeter installation

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Ing. Vlastimilu Beranovi CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval všem přátelům, kteří mě ve studiu podporují, největší dík si však zaslouží rodiče, bez jejich podpory bych nikdy neměl možnost tuto práci sepsat.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Úvod.....	12
1 Základní pojmy a definice	13
1.1 Reynoldsovo číslo	14
1.2 Bernoulliho rovnice.....	15
1.3 Rovnice kontinuity	15
1.4 Senzory průtoku	15
2 Měření průtoku	17
2.1 Průřezové průtokoměry – škrťící orgány	18
2.2 Rychlostní průtokoměry	19
2.2.1 Pitotova trubice	19
2.2.2 Prandtlůva trubice	20
2.3 Průtokoměry s proměnným průřezem	21
2.3.1 Konstrukce plováčkových průtokoměrů.....	21
2.4 Turbínové a lopatkové senzory průtoku	22
2.4.1 Lopatkové radiální průtokoměry	22
2.5 Objemové průtokoměry.....	23
2.5.1 Oválný průtokoměr	23
2.5.2 Průtokoměry pevných látek.....	24
2.5.3 Dopravníková váha	24
2.6 Deformační průtokoměry	25
2.7 Ultrazvukové senzory průtoku	26
2.7.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry	26
2.8 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly	27
2.9 Průtokoměry se značením tekutiny	28
2.10 Vírové průtokoměry	29
2.11 Tepelné průtokoměry – kalorimetrický průtokoměr	30
3 Indukční průtokoměry	31
3.1 Princip	31
3.2 Chování reálného indukčního průtokoměru	32
3.3 Vlastnosti kapaliny.....	32
3.3.1 Vodivost látky	32
3.3.2 Kompenzace měrného odporu média	33
3.3.3 Rychlost proudícího média.....	33
3.4 Stejnoseměrné průtokoměry	34
3.4.1 Impulsní stejnosměrné magnetické pole	34
3.4.2 Průběh magnetické indukce B v podobě lichoběžníku	35
3.5 Střídavý průtokoměr.....	36
3.5.1 Spínané střídavé magnetické pole	37
3.6 Rozlišení směru proudění.....	37
3.7 Rozdělení indukčních průtokoměrů	39

3.7.1	Průtokové	39
3.7.2	Ponorné	39
3.7.3	Zásuvné	39
3.7.4	Bodové	40
3.7.5	Plošné	40
3.7.6	Průtokoměry pro nezaplňené potrubí	40
3.8	Všeobecné zásady pro výpočet nejistoty měření	40
3.8.1	Definice chyby	40
3.8.2	Definice směrodatné odchylky	40
3.8.3	Definice nejistoty	41
3.9	Vlastnosti elektrod a nejistoty vzniklé při provozu průtokoměru.....	41
4	Instalace průtokoměru	43
5	Nabídka průtokoměrů.....	47
5.1	Indukční bateriový průtokoměr COMAC CAL FLOW 45, DN32.....	47
	Závěr	49
	Studijní literatura a zdroje.....	50

Seznam použitých zkratk a symbolů

označení	jednotka	význam
v, v_1, v_2, v_i, c_o	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost
\bar{v}, \bar{v}_s	$m \cdot s^{-1}$	Střední rychlost
t	s	Čas
l_d	m	Dráha
l, L, D	m	Vzdálenost, délka
Q_v	$m^3 \cdot s^{-1}$	Objemový průtok
q_v	$m^3 \cdot s^{-1}$	Okamžitý objemový průtok
Q_m	$kg \cdot s^{-1}$	Hmotnostní průtok
q_m	$kg \cdot s^{-1}$	Okamžitý hmotnostní průtok
V	m^3	Objem média
m	kg	Hmotnost
S, S_1, S_2, S_i	m^2	Průřez
ρ, ρ_2	$kg \cdot m^{-3}$	Hustota
p	Pa	Tlak
g	$m \cdot s^{-2}$	Tíhové zrychlení
h, h_1, h_2	m	Výška
η	Pa.s	Dynamická viskozita
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	Kinematická viskozita
D, DN	m	Vnitřní průměr potrubí
d	m	Průměr škrťacího orgánu
C	-	Průtokový součinitel
α_s	-	Úhrnný průtokový součinitel
ε	-	Expanzní součinitel
β	-	Poměrové zúžení
P_s, p_1, p_2	Pa	Statický tlak
P_d	Pa	Dynamický tlak
P_t	Pa	Celkový tlak
C_d	-	Koeficient ztrát
A_2	m^2	Plocha prstence
A	m^2	Plocha plováku
f	Hz	Frekvence
K_1	-	Součinitel turbínového senzoru
$\vec{\omega}$	$rad \cdot s^{-1}$	Úhlová rychlost
ω	-	Osa kmitání
Re_D, Re_e	-	Reynoldsovo číslo
F_A, F_G, F_d	N	Působící síla
F_c	N	Coriolisova síla
\vec{a}_c	$m \cdot s^{-2}$	Coriolisovo zrychlení
K_c	-	Součinitel závislý na tvaru terčíku
b	m	Šířka tělíska
S_{tr}	-	Strouhalova konstanta
A_k	-	Konstanta závislá na konstrukci

c_p	$\text{J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita tekutiny
α	$^\circ$	Úhel
k	-	Korekční činitel
T_1, T_2	$^\circ\text{C}$	Teplota ze snímače
T	$^\circ\text{C}$	Teplota
P_e	W	Příkon tepelného zdroje
F_e	N	Elektrická síla
U, u	V	Napětí
B	T	Magnetická indukce
σ	S.m^{-1}	Vodivost
E	V.m^{-1}	Intenzita elektrického pole
f_n	Hz	Frekvence nosné
f_v	Hz	Frekvence signálu
U_b	V	Napětí budícího vinutí
C_i, C_d	F	Kondenzátor
R_i, R_d	Ω	Rezistor
u_u	V	Užitečné napětí
u_r, U_N	V	Rušivé napětí
T_c	s	Doba periody
t_r	s	Doba nárůstu napětí
t_k	s	Doba poklesu napětí
u_s	V	Průnik síťového napětí
u_n	V	Pomalou proměnné rušivé napětí
t_{v1}, t_{v2}	s	Interval pro získání vzorků signálu
$U_M, -U_M$	V	Maximální napětí
u_v	V	Napětí vzniklé vířivými proudy
$i(t)$	A	Proud
u_p	V	Pohybové napětí
u_t	V	Transformační napětí
τ	s	Doba klíčování
s_x, s_{qv}	-	Směrodatná odchylka
E_{qv}	-	Relativní nejistota
e_{qv}	-	Nejistota
n	-	Aritmetická střední hodnota
X, X_i	-	Proměnná
\times		Vektorový součin
J, Z		Místo odběru tlaku v průtokoměru
HCl		Kyselina chlorovodíková
DP		Diferenční průtokoměr
T_a, T_b		Snímač teploty
H		Zdroj tepelné energie
F		Průtokoměr
V_1, V_2		Vysílač, přijímač

Úvod

Zjišťování a měření protečeného množství patří mezi nejstarší měření. Historie problematiky měření průtočného množství sahá až do roku 5000 let př. n. l. V současnosti je měření průtoku nezbytné a běžně používané. Příkladem může být tankování pohonných hmot, odtáčení vody z městského řádu, či měření průtoku krve. Tato problematika patří vedle teploty a tlaku mezi nejběžnější měření.

Měření průtoku zaujímá velice široký okruh metod a mnoho typů snímačů, které se neustále rozvíjí, a jsou na něj kladeny stále vyšší nároky. Pro výběr správné metody a snímače je důležité velmi dobře znát látku, kterou budeme měřit, protože univerzální průtokoměr, který měří vše, neexistuje. Primárně můžeme průtokoměry dělit na základě skupenství měřených látek nebo prostředí, ve kterém budeme měřit, například provozní teplota, tlak, vlhkost a jiné. Podrobněji se budu dále zajímat o chemické složení, množství, teplotu a tlak měřené veličiny.

Tato práce slouží jako přehled metod, které se používají pro měření průtoku. V hlavní části práce, jak již zadání napovídá, představím podrobně indukční průtokoměry. V této části představím princip indukčních průtokoměrů, kompenzaci vznikajících nejistot měření při provozu a v neposlední řadě správnou montáž.

1 Základní pojmy a definice

Tekutinou je označována látka, která nemá určitý tvar a při výskytu v nádobě má tendenci sledovat obrysy nádoby. Podobné vlastnosti, jako má kapalina, mají také plyny a páry.

Rychlost, kterou se částice pohybuje, je vektor v , jehož směr je shodný se směrem tečny k dráze částice, a jeho velikost je poměr elementu dráhy Δl_d a času Δt potřebnému k jeho proběhnutí, tj.

$$\vec{v} = \frac{\Delta l_d}{\Delta t} \quad (1.1)$$

nebo střední hodnota rychlosti pohybu molekul (částic) plynu.

Střední průřezová rychlost tekutiny znamená poměr objemového průtoku q_v k ploše průtočného průřezu nebo objem tekutiny ΔV , který proteče určitou plochou za časový interval Δt

$$Q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Při změně objemového průtoku s časem platí pro okamžitou hodnotu vztah následující, který upřesňuje situaci a je v souladu s normou

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1.3)$$

Objem, protékající za časový interval Δt , je určen integrálem

$$V = \int_0^{\Delta t} q_v dt \quad (1.4)$$

Hmotnostní průtok Q_m je množství média vyjádřeno hmotností, neboli hmotnost kapalného média Δm protékající průtočným místem za časový interval Δt

$$Q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1.5)$$

U změny hmotnostního průtoku s časem platí okamžitý hmotnostní průtok (přesnější vyjádření a v souladu s normou) [1]

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (1.6)$$

Protékající množství je vyjádřené pomocí vzorce

$$m = \int_0^{\Delta t} q_m dt \quad (1.7)$$

Hmotnostní průtok lze vyjádřit z objemového průtoku použitím vzorce

$$q_m = \rho q_v \quad (1.8)$$

Kde ρ je hustota měřené tekutiny. Známe-li plochy průtočného průřezu S a střední rychlosti proudění v , lze určit objemový průtok ze vztahu

$$q_v = Sv \quad (1.9)$$

1.1 Reynoldsovo číslo

Reynoldsovo číslo Re je důležitým kritériem pro posouzení druhu proudění. Toto číslo znázorňuje poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí, které má světlost D je Reynoldsovo číslo Re_D definováno vztahem

$$Re_D = \frac{\text{setrvačné síly}}{\text{třecí síly}} = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu} \quad (1.10)$$

Kde η je dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]
 ν je kinetická viskozita tekutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Pro dynamickou viskozitu platí vztah

$$\eta = \nu \rho \quad (1.11)$$

Pro představu uvedu příklad. Reynoldsovo číslo průtoku krve cévkami je cca 2000. V posledních letech ukazují výsledky z počítačové simulace, že přechod z laminárního do turbulentního proudění se děje skokově. Zhruba do roku 1970 se předpokládalo, že přechod je plynulý. [1]

1.2 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice popisuje energetické poměry při proudění tekutin. Tato rovnice je jedním z příkladů o zákonu zachování energie na proudící médium. Základním předpokladem je rovnice kontinuity, která nám popisuje nestlačitelnost tekutiny a zároveň rychlost, která je rozložena po celém průřezu potrubí

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = konst. \quad (1.12)$$

Kde ρ je hustota kapaliny
 v je rychlost proudění
 p je tlak v kapalině
 m je hmotnost tekutiny
 g je tíhové zrychlení
 h je nadmořská výška

1.3 Rovnice kontinuity

U nestlačitelných tekutin musí být zachována hmotnost tekutiny proudící v uzavřeném potrubí mezi dvěma místy pozorování o ploše průřezu S_1 a S_2 , a rychlost v_1 a v_2 za stejný časový interval. Jinak by došlo k hromadění nebo rozpouštění tekutiny v potrubí.

Obecně platí pro proudění nestlačitelné tekutiny a libovolný průřez potrubí vztah

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_i v_i = konst. \quad (1.13)$$

1.4 Senzory průtoku

Senzory průtoku umožňují převádět měřené veličiny (průtoky) na fyzikální veličiny, které jsou jednoznačně závislé na rychlosti proudícího média nebo na kinetické energii.

Hmotnostní nebo objemový průtok se měří přímo podle definičních vztahů. Toto měření lze realizovat pomocí dávkovacích senzorů, které rozdělují tekutinu na přesně dané díly a přemístí je ve směru proudění. Konstrukce těchto senzorů spočívá v odměrných nádobách, které kinetickou energii proudícího média samočinně střídavě plní a vyprazdňují. Jiným přímým průtokoměrem je měřidlo založené na vážení určité části protékajícího média. Využití najdou především pro měření protékajícího množství u pevných látek.

Převážná část měření je nepřímá a spočívá v závislosti výstupní veličiny průtokoměru na kinetické energii nebo rychlosti proudícího média.

Průtokoměry (senzory proudění) lze rozlišovat podle měřené veličiny na objemový nebo hmotnostní průtok, nebo podle místa použití například v medicíně a příbuzných oborech, kde jsou kladeny zvláštní požadavky například na průtok sanitárních tekutin.

Dále se průtokoměry rozlišují podle toho, zda se jedná o otevřený kanál nebo o potrubí. [1]



Obr. 1.1 Rozdělení průtokoměrů [1]

2 Měření průtoku

V této části bakalářské práce představím stručně možnosti a způsoby, které se používají pro měření průtočného množství. Od každého tematického celku představím nejpoužívanější zástupce průtokoměrů. [1]

Tab. 2.1 Výběr průtokoměru – osvědčené aplikace jednotlivých typů průtokoměrů [1]

Kapaliny	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
čisté (voda)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	--	X
pomalou tekoucí (<2l/min)	X	X	X	X	--	X	?	X	X	?	--	--
rychle tekoucí (>20l/min)	X	--	?	X	?	X	X	--	--	--	--	X
nevodivé	X	X	X	X	X	--	X	X	X	X	--	--
velké potrubí (DN>500)	X	--	--	?	--	X	X	--	--	X	--	X
horké (>200 °C)	X	?	--	X	X	--	?	X	?	X	--	--
viskózní (>50 cP)	?	--	X	--	--	X	?	X	--	?	--	--
kryogenické (tekutý O ₂)	--	--	X	X	--	X	X	X	--	X	--	--
potraviny (mléko, pivo)	--	--	X	X	--	X	X	X	--	--	--	--
Plyny												
obecné (vzduch apod.)	X	X	?	X	X	--	?	X	X	?	--	--
pomalou proudící (<20 l/min)	?	X	X	?	--	--	--	X	X	X	--	--
rychle proudící (klimatizace)	X	--	--	--	?	--	--	--	X	?	--	--
horké (>200 °C)	X	--	--	--	X	--	?	?	?	X	--	--
pára	X	--	--	--	X	--	?	?	--	X	--	--
Různé směsi												
kaše (barvy)	?	--	--	--	--	X	?	?	--	--	--	--
směs kapalin (voda, olej)	X	--	?	?	X	?	?	X	--	?	--	--
směs plyn/kapalina	--	--	--	--	--	?	--	?	--	--	--	--
korozivní kapaliny	?	?	?	?	?	?	X	X	--	--	--	--
korozivní plyny (HCl)	?	?	--	?	?	--	--	--	--	--	--	--
kaly v hornictví	?	--	--	--	--	X	--	--	--	?	X	--
prášky/zrna	--	--	--	--	--	--	--	--	--	?	X	--
Otevřené kanály												
obecné (řeky, kanály)	--	--	--	--	--	X	--	--	--	X	--	X
odpadové kanály	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	X
zavlažování	--	--	--	--	--	X	--	--	--	--	--	X

Vysvětlivky:

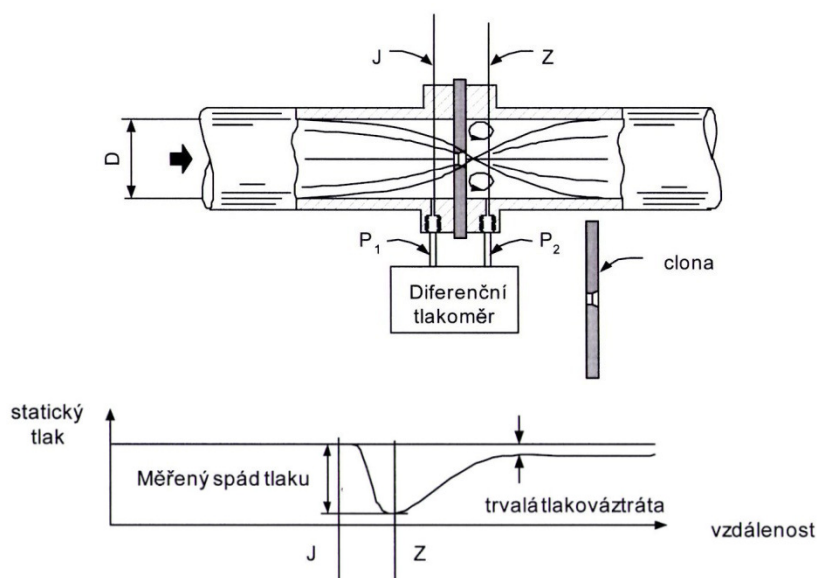
X vhodné ? vhodné za jistých podmínek
 -- nevhodné

Kategorie průtokoměrů:

S1	DP-tlak. Rozdíl - škrťící orgány	S7	Ultrazvukové
S2	Jiné typy DP (pitot, plováčkové)	S8	Coriolisovy
S3	Terčíky	S9	Tepelné
S4	Turbíny	S10	Jiné (vážení, značky, rad. záření)
S5	Vírové / fluidické	S11	Průtokoměry pevných částic
S6	Elektromagnetické	S12	Otevřené kanály

2.1 Průřezové průtokoměry – škrťící orgány

Průřezové průtokoměry využívají zúžených míst v potrubí, takzvaného škrťícího orgánu. Škrťící orgán zúží průtočnou plochu. Rozdíl statických tlaků získáme diferenčním tlakoměrem, kterým snímáme tlak v potrubí před a za škrťícím orgánem. Rozdíl tlaků je závislý na velikosti průtoku. Průtočné množství je popsáno na základě Bernoulliho rovnice, kde platí mezi tlakovým rozdílem Δp před a za škrťícím orgánem, objemovým q_v a hmotnostním q_m průtokem následující vztahy [1][10]



Obr. 2.1 Průběh proudnic tlaku v závislosti na vzdálenosti od clony. Nejčastější místo odběru tlaku je na přírubě J a v místě Z. [1]

$$v = \alpha_s \varepsilon \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.1)$$

$$Q_v = \alpha_s \varepsilon A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.2)$$

$$Q_m = \alpha_s \varepsilon A \sqrt{2 \Delta p \rho} \quad (2.3)$$

$$v = C \varepsilon \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.4)$$

$$q_v = C\varepsilon A \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}} \quad (2.5)$$

$$q_m = C\varepsilon A \sqrt{2\Delta p\rho} \quad (2.6)$$

Kde ε je expanzní součinitel (u kapalin $\varepsilon=1$, u plynů $\varepsilon<1$)
 C je průtokový součinitel škrťícího orgánu, závislý na Reynoldsově čísle a poměrovém zúžení β definované vztahem

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (2.7)$$

Kde d je průměr otvoru škrťícího orgánu
 D je vnitřní průměr potrubí

Průřezové průtokoměry jsou velmi často používané v průmyslových aplikacích. Pokles tlaku může být vyvolán celou škálou geometricky popsáných zúžení. Během let byly hlavice průtokoměrů dobře analyzovány, jsou tedy tyto průtokoměrné hlavice k dispozici v celé škále sestav. Mezi nejběžnější škrťící orgány patří clona, dýza a Venturiho trubice.

2.2 Rychlostní průtokoměry

Mezi nejznámější rychlostní průtokoměry patří Pitotova a Prandltova trubice. Tato měřidla měří průtok na základě naměřené hodnoty vztažené k rychlosti proudícího média.

2.2.1 Pitotova trubice

Tento typ průtokoměru patří mezi nejjednodušší. Jedná se o trubici, která je zahnuta do pravého úhlu a její ústí je nastaveno kolmo na proudící médium. U konce sondy klesne rychlost proudění na nulu a všechna kinetická energie se přemění v potenciální energii. Rychlostní sonda udává celkový tlak P_t . Celkový tlak je složen ze statického tlaku P_s a dynamického tlaku P_d . Statický tlak se snímá v jiném místě než tlak celkový, jak je znázorněno na obrázku 2.2. Toto je největším nedostatkem Pitotovy trubice. [3]

Platí zde

$$P_t = P_s + P_d \quad (2.8)$$

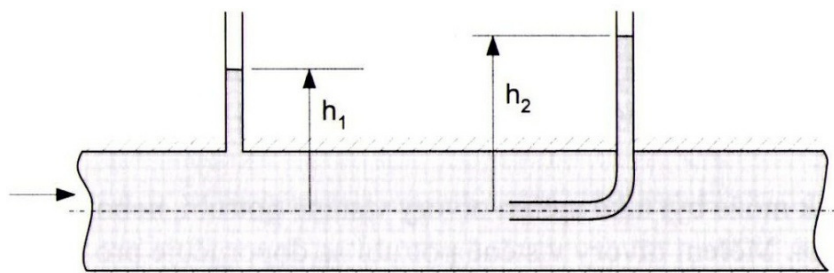
$$P_s = h_1 \rho g \quad (2.9)$$

$$P_d = h_2 \rho g = \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.10)$$

A při známé hustotě tekutiny ρ je její rychlost

$$v = \sqrt{\frac{2(P_t - P_s)}{\rho}} \quad (2.11)$$

Objemový průtok Q_v se určuje z násobku rychlosti a plochy průřezu. Je však důležité sondu pro měření umístit do místa, kde je rychlost proudění média konstantní, neboli kde médium proudí průměrnou rychlostí. [3]



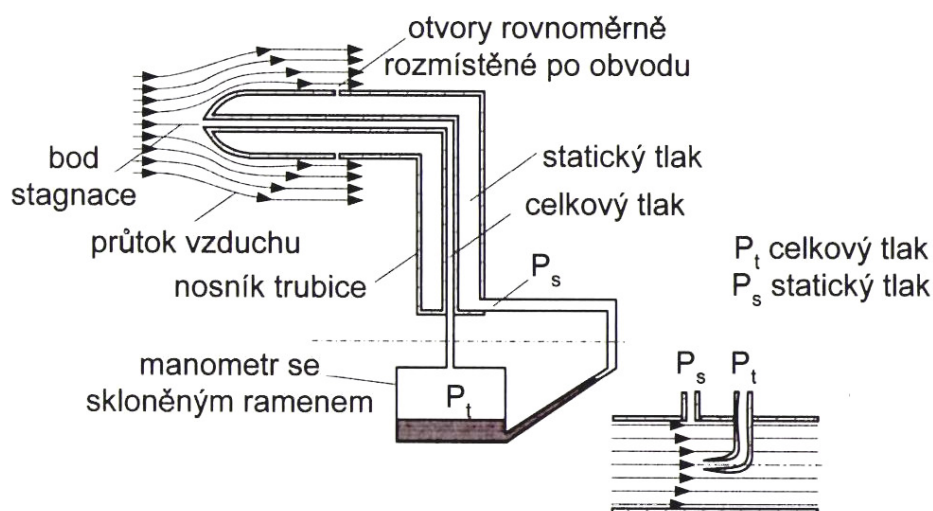
Obr. 2.2 Princip Pitotovy trubice [1]

2.2.2 Prandtlůva trubice

Tato rychlostní sonda na rozdíl od Pitotovy trubice snímá statický tlak i celkový tlak v jednom místě. Tvar má shodný s Pitotovou trubicí, tedy do písmene L. Pro otvory snímání statického tlaku se používá vzdálenost větší než je trojnásobek průměru válcové sondy. Válcová sonda je použita z důvodu snadné konstrukce. Ideálním tvarem sondy by byla sonda ve tvaru rotačního paraboloidu, což je obtížné vyrobit.

Jak je znázorněno na obrázku 2.3, statický tlak je přiváděn do diferenčního senzoru tlaku otvorem na boku trubice, který je orientován kolmo ke směru proudění média. Je vhodné, aby na místě měření statického tlaku nevznikaly turbulence, respektive, aby turbulence byly minimální. Celkový tlak je snímán na hrotu trubice otvorem s osou rovnoběžnou se směrem proudění.

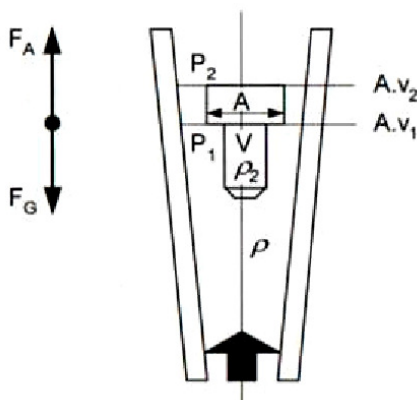
Pro měření objemového průtoku je nutné z naměřených hodnot určit střední rychlost profilu. K tomuto se používá graficko-početní metoda, která platí pro kruhové potrubí. [1]



Obr. 2.3 Prandtlůva trubice tvaru L připojená k diferenčnímu manometru měřícímu rozdíl celkového tlaku P_t a statického tlaku P_s . [1]

2.3 Průtokoměry s proměnným průřezem

Průtokoměry s proměnným průřezem se řadí do odvětví průtokoměrů na principu tlakového rozdílu. Rychlost proudícího média vyvolá změnu polohy plováčku.



Obr. 2.4 K odvození funkce plováčkového průtokoměru [1]

Plováček, který má plochu A , hustotu ρ a objem V se vznáší v tekutině o hustotě ρ , proudící v konické trubici, kde se ustálí v poloze odpovídající rovnováze sil působících směrem po proudu (F_A) a proti proudu (F_G). Tvar trubice zajišťuje rozdíl mezi spodním a horním průřezem. Z tohoto důvodu a na základě Bernoulliho rovnice, se liší rychlost v_1 a v_2 a statické tlaky p_1 a p_2 spodní a horní části plováčku. Objemový průtok je roven

$$q_v = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gV}{A} \left(\frac{\rho_2}{\rho} - 1 \right)} = f(A_2) \quad (2.12)$$

Kde C_d je koeficient ztrát (závislý na viskozitě)
 A_2 je plocha prstence mezi plovákem a trubicí

Pro každou hodnotu průtoku q_v se plováček ustálí v poloze tak, aby plocha A_2 prstence mezi ním a stěnou odpovídala této rovnici. Výška plováku je pak odečítána na stupnici, která se nachází na stěně trubice. Při konickém tvaru trubice je obecně stupnice kvadratická. [1]

2.3.1 Konstrukce plováčkových průtokoměrů

Obecně tyto průtokoměry jsou v základní poloze, tzn. při nulovém průtoku, udržovány gravitací (pak pracuje pouze ve svislé poloze) nebo působením kalibrované pružiny.

Tvary plováků jsou různé. Liší se podle aplikace využití. U většiny tvarů plováku je společný znak, a to ostrý okraj sloužící k určení polohy plováčku. Materiál používaný u kónických trubec pro bezpečnou tekutinu, jakou je například voda, je borosilikátové sklo. Pro měření agresivních tekutin nebo u měření, kde by hrozilo prasknutí trubice, je použito kovových trubek, nejčastěji z nerezové oceli. U kovových trubek je snímání polohy magnetické. Průměr trubec je v rozmezí 15 až 100 mm při tlaku do 50 barů a teploty do 540 °C.

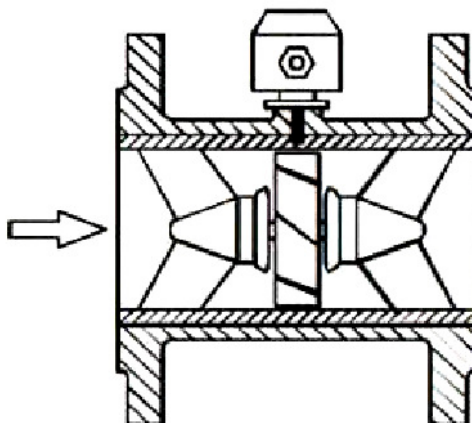
2.4 Turbínové a lopatkové senzory průtoku

Proudící médium uvede do pohybu lopatkový rotor, který má vhodně naklopené a zakřivené lopatky, jež jsou umístěny v ose tělesa průtoku. Prostor vznikající mezi lopatkami a potrubím odpovídá určitému objemovému množství. Objemový průtok se pak určuje z počtu průchodů lopatek pod senzorem polohy. Počet lopatek může být různý, běžně bývá v rozsahu od 6 až do 20.

Objemový průtok není přímo závislý na hmotnosti média. Z tohoto důvodu se turbínové průtokoměry nezařazují do skupiny pracujících na základě kinetické energie proudící kapaliny. Na výstupu měřidla jsou impulzy, které jsou získané zesílením a tvarováním signálu ze senzorů průchodu lopatek. Měřená veličina je frekvence impulzů f , která je úměrná objemovému průtoku q_v . V ideálním případě platí

$$f = K_1 q_v \quad (2.13)$$

Kde K_1 je součinitel turbínového senzoru.

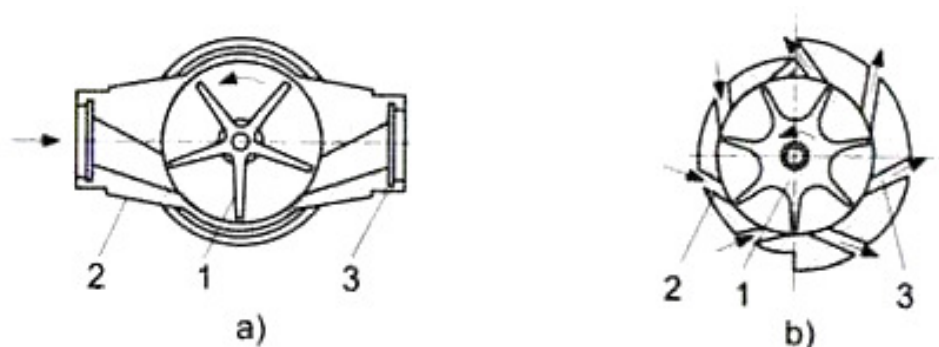


Obr. 2.5 Turbínový průtokoměr v řezu [1]

V turbínovém průtokoměru se využívá usměrňovač proudění. Usměrňovač je umístěn před i za měřícím členem.

2.4.1 Lopatkové radiální průtokoměry

Zde je použito pro měření oběžné kolo s radiálními lopatkami obrázek 2.6, které jsou kolmé ke směru proudění média. Účinnost průtokoměru lze zvýšit použitím několika vtoků. Při použití více vtoků k lopatkám se využívá k přívodu média ke kolu řady tangenciálních otvorů (2) a následně médium odtéká opačně orientovanými otvory (3). Uplatnění tyto průtokoměry nachází při měření užitkové vody v rozsahu od 0,8 do 500 l za minutu, při teplotě 40 °C a maximální tlaku 15 barů. Nejistoty měření dosahují 1%. Snímání otáček je řešeno pomocí Hallových senzorů s prodlouženou životností nebo magneticky ovládaným jazýčkovým relé. [1]



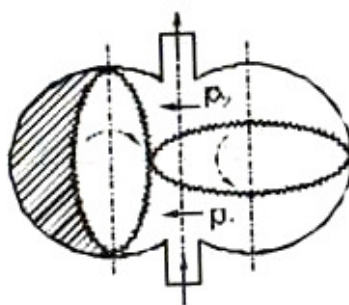
Obr. 2.6 a) Turbína s tangenciálním vtokem: 1 oběžné kolo s radiálními lopatkami, 2 vstupní hrdlo, 3 výstupní hrdlo,
b) příčný řez několika vtokovými průtokoměry: 1 oběžné kolo, 2 vtokové otvory, 3 výtokové otvory [1]

2.5 Objemové průtokoměry

Objemový průtokoměr měří přímo objem nebo hmotnost média. Je buď spojitý, nebo diskrétní. U spojitého snímání se médium akumuluje po danou dobu a po ukončení je výsledkem údaj o měřeném objemu. Podstatou diskrétního měření je dělení média na konečné objemové dávky, proto dávkovací průtokoměry. Měřené médium je přesně děleno na stejné dávky tím, že je nuceno vtékat do přesně vymezených prostorů a následně z nich pak vytékat. Proces částečně připomíná převod analogového signálu elektrické podstaty na číslicový.

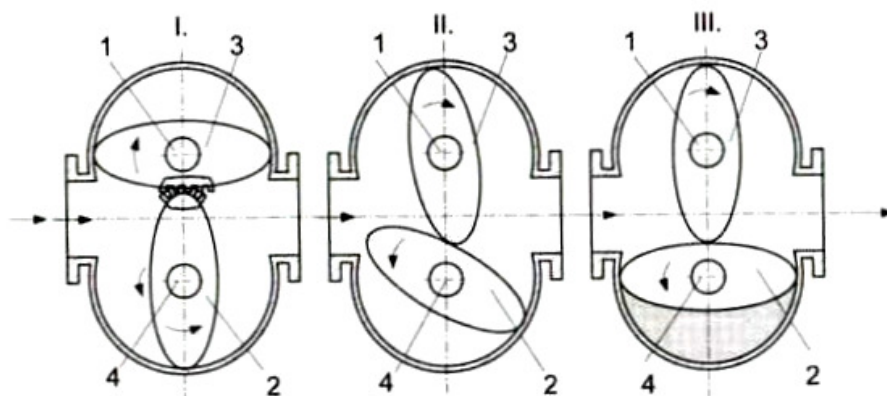
2.5.1 Oválový průtokoměr

Oválový průtokoměr je sestaven párem ozubených oválných těles, která do sebe i do komory zapadají stejně jako na obrázku 2.7. Tlaky p_1 a p_2 vyvolávají točivý moment. Při otáčení vznikají mezi tělesy a stěnami střídavě se plnící a vyprazdňující komory.



Obr. 2.7 Oválový průtokoměr s ozubenými koly [1]

Počet otáček je zpracován v čítači jako veličina, která je úměrná objemovému průtoku. Oválné průtokoměry se využívají při průtoku od jednotek dm^3/h do $10^3 \text{ dm}^3/\text{h}$, do tlaku 2 MPa a teploty až 290 °C. Tyto průtokoměry mohou dosahovat velmi malých nejistot přibližně 0,1 %. [1]



Obr. 2.8 Fáze činnosti oválového průtokoměru s ozubenými koly [1]

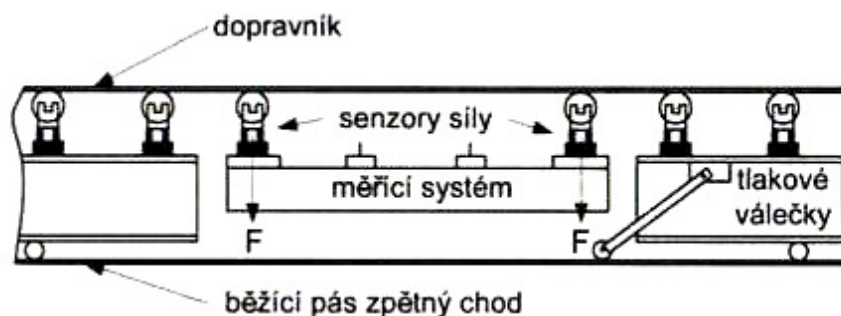
Tento typ průtokoměru se používá pro kapalné plyny, louhy, kyseliny, tuky, alkoholy, lepidla, jedlé oleje, mazací oleje, kakaové máslo, benzín, ovocné šťávy apod. Jsou vhodné pro měření kapalin, které mají vysokou viskozitu. Vznikají zde poruchy usazováním kapaliny na zubech. Životnost těchto průtokoměrů silně závisí na schopnostech mazání měřené tekutiny.

2.5.2 Průtokoměry pevných látek

Měření pevných látek je myšleno například ve formě granulí, pudrů, hrudek apod. Obecně jsou používány specializované metody, které jsou založené na měření hmotnosti, nebo účinku kinetické energie pohybující se látky.

2.5.3 Dopravníková váha

Tento způsob měření je nejběžněji používaný. Jak je znázorněno na obrázku 2.9, běžící pás je opatřen senzory, které snímají váhu, a rychlost dopravníku je odvozena z otáček hnací hřídele. Vynásobením obou veličin získáme hmotnostní průtok dopravované látky.



Obr. 2.9 Měření průtoku pevných látek vážením dopravníku [1]

Metoda na principu vážení je vhodná pro dávkování materiálů, jako jsou například obilí a potravinářské výrobky, postupy při spalování odpadů, plnění sudů a podobně. Dopravník může být nakloněn až o 20°, nejistoty měření jsou větší než 1%. [1]

2.6 Deformační průtokoměry

Deformační průtokoměr využívá kinetické energie proudícího média k deformaci reakční desky. Reakční deska může být různého tvaru například kruhový terčík, pádlo nebo nosník. Pokud je pružný člen (reakční deska) symetrický, může být měřen průtok v obou směrech. Na základě vzniklé síly dynamickým tlakem tekutiny o hustotě ρ , ploše reakční desky S a rychlosti proudění v , je určena síla působící na terčík F_d vztahem

$$F_d = K_c S \frac{\rho v^2}{2} \quad (2.14)$$

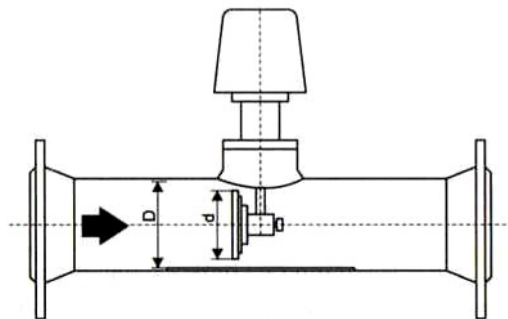
Kde v je průměrná rychlost v prostoru mezi terčíkem a potrubím
 K_c je součinitel závislý na tvaru terčíku

Například pro rovinné terčíky je hodnota $K_c = 1,28$. Rovnice F_d platí při turbulentním proudění v celém rozsahu měřených průtoků. Vznik turbulentního proudění v okolí měřícího členu se děje při hodnotě Reynoldsova čísla cca $Re > 1000$ a rozšíření na celé potrubí nastane při cca $Re > 2000$. Hodnoty jsou přibližné, protože zde závisí na drsnosti povrchu potrubí a například na tvaru vstupní části terčíku. Síla F_d je závislá na viskozitě média při hodnotách Re od 1000 do 2000, pro vyšší hodnoty na viskozitě téměř nezávisí. V oblasti laminárního a přechodového proudění se vyskytují vážné odchylky od vztahu F_d .

Objemový průtok o průměru potrubí D a hustotě média ρ je popsán vztahem

$$Q_v = K_c D \sqrt{\frac{F_d}{\rho}} \quad (2.15)$$

Vychýlení reakčního členu je detekováno průtokovými spínači na deformačním principu, které pouze informují o tom, zda se médium pohybuje nebo ne. Pro náročnější aplikace je použito snímání pomocí odporových tenzometrů. U tohoto provedení je velmi důležité a zároveň obtížné správné nalepení tenzometrů na pružný člen.



Obr. 2.10 Zásuvný deformační průtokoměr [1]

Deformačního průtokoměru se využívá především pro měření průtoku znečištěných nebo korozivních kapalin s obsahem pevných částic. [1]

2.7 Ultrazvukové senzory průtoku

Ultrazvukové průtokoměry se rozdělují do tří základních skupin.

1) Přímé impulzní

Přímé impulzní ultrazvukové senzory průtoku jsou blíže popsány v následující podkapitole 2.7.1.

2) Zpětnovazební

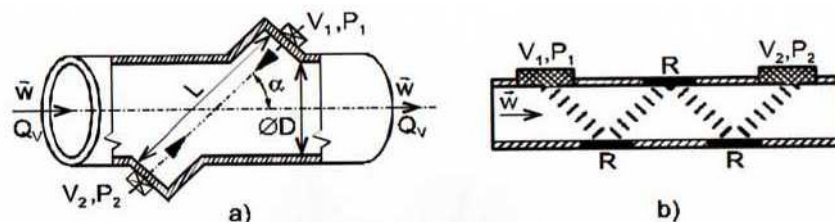
Do měniče, který pracuje v režimu vysílače, je přiveden po zesílení a úpravách fáze výstupní signál z přijímače. Tímto vzniká zpětnovazební zapojení, které utváří oscilátor. Signál z přijímače je buď spojitý, nebo ve tvaru impulzů harmonického signálu.

3) Dopplerovy

Zde dochází k vyhodnocení změny kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od částic, které jsou unášeny proudícím médiem.

2.7.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry jsou založeny na vysílání a přijímání ultrazvukového vlnění při průtoku média. Vysílač V a přijímač P jsou instalovány na stěnách potrubí, kde se měřené médium pohybuje rychlostí v . Proud média má za následek změnu rychlosti ultrazvukového vlnění. Doba šíření ultrazvukového vlnění od vysílače k přijímači je označena jako Δt .



Obr. 2.11 Ultrazvukový senzor průtoku: a) princip, b) prodloužení dráhy šíření ultrazvukového vlnění reflektory R [1]

Δt_1 určíme za pomoci V_1 a P_1 a Δt_2 pomocí V_2 a P_2

$$\Delta t_1 = \frac{L}{c_0 + \bar{v} \cos \alpha} \quad (2.16)$$

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c_0 - \bar{v} \cos \alpha} \quad (2.17)$$

Kde c_0 je rychlost šíření ultrazvuku

Pro střední rychlost \bar{v} platí přibližně

$$\bar{v} \cong \frac{c_0^2}{2L \cos \alpha} (\Delta t_2 - \Delta t_1) \quad (2.18)$$

Tato rovnice pro střední hodnotu rychlosti je odlišná od skutečné hodnoty, proto je zapotřebí zavést korekční činitel k , který závisí na druhu proudění. Poté pro střední hodnotu rychlosti platí

$$\bar{v}_s = \frac{\bar{v}}{k} \quad (2.19)$$

Korekční činitel k , je závislý na Reynoldsově čísle.

Objemový průtok je roven

$$Q_v = S\bar{v}_s \quad (2.20)$$

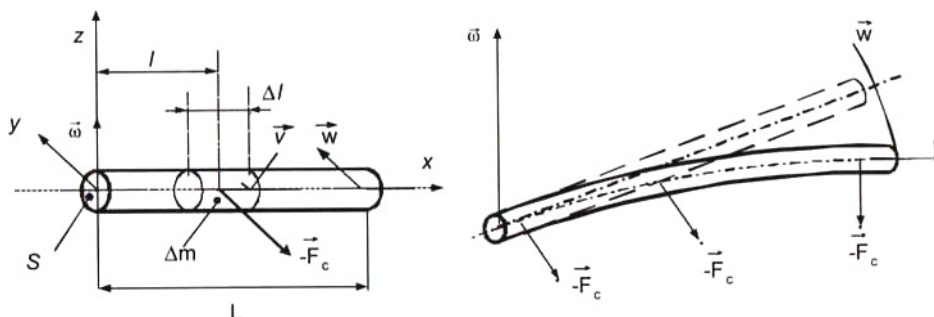
Kde S je plocha průřezu potrubí. [1]

2.8 Hmotnostní průtokoměry na principu Coriolisovy síly

Princip Coriolisova průtokoměru je založen na Coriolisově síle. Těleso, které má hmotnost m a pohybuje se přímočaře rychlostí \vec{v} v soustavě otáčející se úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$, působí síla F_c – Coriolisova síla.

$$\vec{F}_c = m2(\vec{\omega} \times \vec{v}) = m\vec{a}_c \quad (2.21)$$

Kde \vec{a}_c je Coriolisovo zrychlení
 \times je symbol pro vektorový součin



Obr. 2.12 Princip Coriolisovy síly[1]

Médium, které proudí rychlostí \vec{v} a potrubí rotuje úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$, pak na každý element média o hmotnosti Δm působí Coriolisova síla

$$\Delta\vec{F}_c = \Delta m 2(\vec{\omega} \times \vec{v}) \quad (2.22)$$

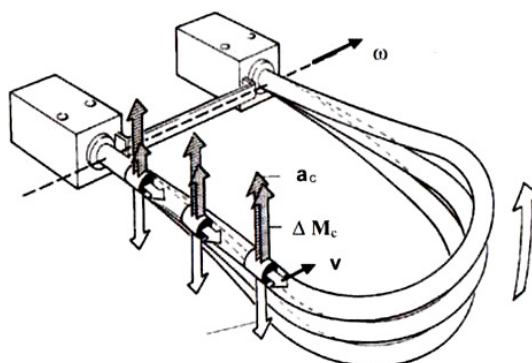
ve směru kolmém na rovinu vektorů $(\vec{\omega}, \vec{v})$.

Vektory jsou navzájem kolmé, z toho vyplývá, že

$$\vec{v} = \frac{\Delta l}{\Delta t}, \quad \Delta\vec{F}_c = \frac{\Delta m}{\Delta t} 2(\vec{\omega} \Delta l) = 2q_m \vec{\omega} \Delta l \quad (2.23)$$

Coriolisova síla je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku Q_m , a tedy jde o přímý převod hmotnostního průtoku q_m na $\Delta \vec{F}_c$.

Trubice pro snímání Coriolisovy síly mohou být provedeny mnoha způsoby. Jedním ze základních provedení je takzvaná U trubice viz obrázek 2.13



Obr. 2.13 Coriolisův průtokoměr s jednoduchou trubicí ve tvaru U [1]

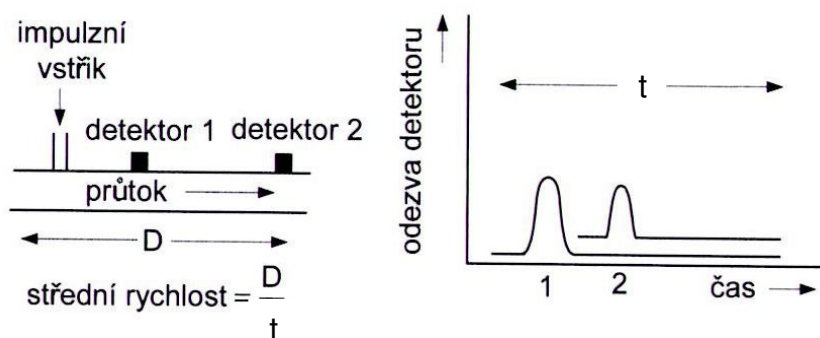
Průtokoměry s trubicí ve tvaru U se při praktickém použití neotáčí, ale trubice kmitá kolem osy ω , jak je vidět na obrázku 2.13. U trubice je vertikálně rozkmitána elektromagnetickou silou. Pohyb trubice je harmonický o kmitočtu $\vec{\omega}$.

2.9 Průtokoměry se značením tekutiny

Médium je doplněno o látku s malou rozpustností. Průchod látky v potrubí je detekován dvěma senzory, které jsou umístěny mimo potrubí, jak je znázorněno na obrázku 2.14. U plynného média je použito radioaktivních látek. Střední rychlost média v potrubí je dána z doby šíření značky Δt mezi detektory, které jsou vzdálené od sebe o délce D .

$$\bar{v} = \frac{D}{\Delta t} \quad (2.24)$$

Z rychlosti proudění média a průměru potrubí lze určit objemový průtok. Podmínkou je zaplněné potrubí a turbulentní proudění. Při přesných rozměrech potrubí lze určit střední hodnotu rychlosti proudění s nejistotou lepší než 1 %.



Obr. 2.14 Určení průtoku z doby postupu značky [1]

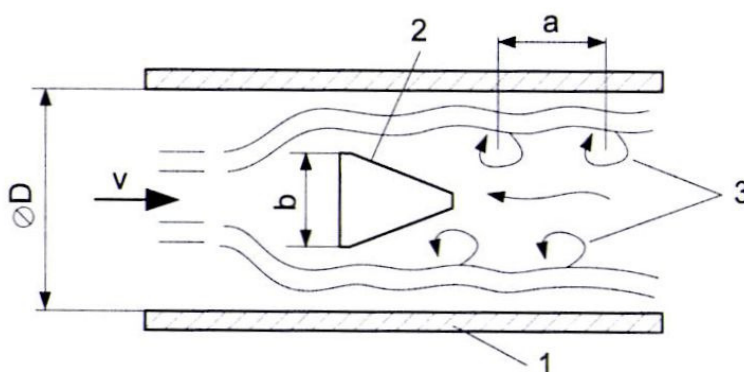
Průtokoměry se značením tekutiny byly používány již starověkými civilizacemi pro měření průtoku vodních toků (předmět byl unášen proudem). Touto metodou lze měřit průtok více fázových směsí.

2.10 Vírové průtokoměry

Proudí-li médium kolem tělíska konického tvaru, vytvoří se na obou stranách za tělískem víry, které kmitají tělesem frekvencí f .

$$f = S_{tr} \frac{v}{b} \quad (2.25)$$

Kde v je rychlost proudu média
 b je šířka tělíska
 S_{tr} je bezrozměrné číslo, Strouhalova konstanta



Obr. 2.15 Princip vírového snímače [1]

Strouhalova konstanta je významný parametr v proudění. Pokud je Strouhalova konstanta konstantní v závislosti na Reynoldsově čísle, je rychlost proudění w přímo úměrná frekvenci tělesa a není ovlivněna změnami viskozity média. Pokud znám Strouhalovu konstantu pro určitý tvar tělíska, lze měřit rychlost průtoku média (množství) jako vírovou frekvenci obtékaného tělesa.

Objemový průtok

$$q_v = \frac{Sfb}{S_{tr}} \quad (2.26)$$

Kde S je průřez potrubí

Měření vírové frekvence je zajištěno pomocí dvou piezoelektrických snímačů. Ty jsou umístěny na obou koncích vírového tělíska, kde jsou mechanicky namáhané silami vyvolanými účinkem vírů. Dvojice snímačů zajišťuje teplotní kompenzaci v širokém rozsahu teplot. Snímač je jednoduchý, robustní a bez nároků na údržbu. [1]

2.11 Tepelné průtokoměry – kalorimetrický průtokoměr

Tento druh průtokoměru pracuje na porovnání teploty před topným tělesem i za ním. Teplo, které je dodáno z topného tělesa, je odvedeno proudícím médiem ke snímači T_b .

Hmotnostní průtok q_m je dán vztahem

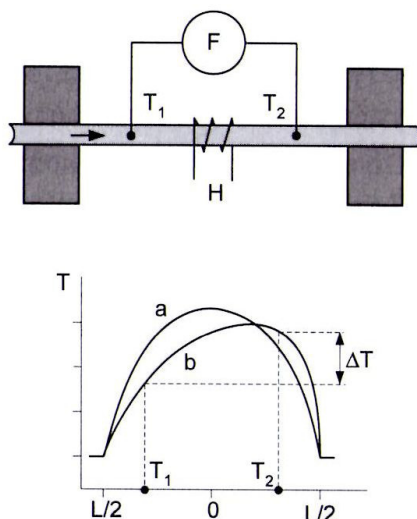
$$q_m = A_k \frac{c_p(T_2 - T_1)}{P_e} \quad (2.27)$$

Kde A_k je konstanta
 c_p je měrná tepelná kapacita tekutiny
 T_1 je teplota před topným elementem
 T_2 je teplota za topným elementem
 P_e je příkon tepelného zdroje

Konstanta A_k je závislá na konstrukci hmotnostního průtokoměru, ale i na vlastnostech měřeného média.

H je zdroj tepelné energie, který je umístěn symetricky, a to buď uvnitř potrubí, nebo vně potrubí mezi snímači teploty T_a a T_b . ΔT je rozdíl teplot, který je vyhodnocován elektronikou v průtokoměru F .

Snímání teploty média a jeho ohřívání je možné provést dvěma způsoby. Jedním ze způsobů je, že médium je ohříváno a jeho teplota snímána vně potrubí. Druhým způsobem je umístění snímačů teploty i topné spirály do potrubí. Vhodnější varianta je umístění vně potrubí bez otvorů. Nehrozí únik média z potrubí, jako když jsou třemi otvory implementovány snímače teploty a topná spirála. [1]



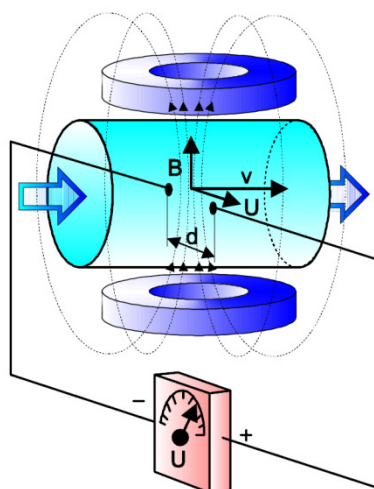
Obr 2.16 Princip kalorimetrického hmotnostního průtokoměru
 H - topné těleso, T_a a T_b - senzory teplot, F - průtokoměr, $L/2$ - polovina délky trubice [1]

3 Indukční průtokoměry

Indukční průtokoměry jsou v dnešní době velice perspektivní a rozšířenou metodou měření průtoku kapalin. Pomocí těchto průtokoměrů lze dosáhnout vysoké přesnosti měření a měření širokého spektra kapalin. Jedinou podmínkou je, že kapalina musí být dostatečně vodivá. Například její viskozita však může být vysoká, a přesto nedojde k ucpání sondy. Díky konstrukci nedojde k ucpání ani potrubí a tím znemožnění měření.

Pro názornější označení indukčního průtokoměru je vhodný název elektromagnetický průtokoměr. Také v zahraniční literatuře se častěji setkáme s názvem *Electromagnetic flowmeters*. Norma ČSN EN 24006 doporučuje pojmenování indukční průtokoměr, proto v dalším textu budeme používat místo elektromagnetického průtokoměru, indukční průtokoměr.

3.1 Princip



Obr. 3.1 Princip indukčního průtokoměru [7]

Princip indukčního průtokoměru je popsán dvěma principy. První princip indukčního průtokoměru je popsán Faradayovým zákonem o elektromagnetické indukci. Indukované napětí je vytvořeno pohybem vodiče o délce l , který se pohybuje rychlostí v za působení kolmého magnetického pole o indukci B . Výsledné naindukované napětí je vyjádřeno vztahem

$$U = Blv \quad (3.1)$$

Druhým principem je názornější a přesnější popis indukčního průtokoměru postavený na Lorentzově zákoně. Za pomoci Lorentzova zákona určíme magnetické síly, jež působí na náboj q , který se pohybuje v magnetickém poli o indukci B , rychlostí v a elektrické síly působící na náboj v elektromagnetickém poli o intenzitě E .

Magnetické pole vyvolá sílu F_m , která vychyluje náboj q s rychlostí v . Síla F_m je dána vektorovým součinem

$$F_m = q(v \times B) \quad (3.2)$$

Směr lze snadno určit pomocí pravidla pravé ruky. Tato síla působí na náboje, které se vychylují a usazují na elektrodách a vytvářejí rozdíly potenciálů. To znamená, že na elektrodách vzniká rozdílem potenciálů napětí U . Intenzita elektrického pole E je v homogenním poli dána podílem mezi napětím na elektrodách U a vzdáleností mezi nimi D .

$$|\vec{E}| = \frac{U}{D} \quad (3.3)$$

Elektrická síla F_e , která působí na elektrické náboje v opačném směru jako síla magnetická, je dána Lorentzovým zákonem

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (3.4)$$

Při homogenním elektrickém i magnetickém poli a při rovnosti obou sil nastane rovnováha. Poté pro napětí mezi elektrodami, za předpokladu kolmosti osy elektrod D na rovinu, v níž leží navzájem kolmé vektory B a v , platí známá souvislost

$$U = DBv \quad (3.5)$$

3.2 Chování reálného indukčního průtokoměru

Vztah vzorce 3.5 pro signál elektrody indukčních průtokoměrů platí pro rovnoměrné rozložení rychlosti po průřezu potrubí. Pro vyjádření reálného napětí U rozdělíme průřez na malé úseky Δl_i s konstantní rychlostí v_i a součtem těchto částí získáme reálné výsledné napětí

$$u = B \sum_{i=1}^n v_i \Delta l \quad (3.6)$$

Většinou ale počítáme s průměrnou rychlostí, z toho vyplývá vztah

$$U = DB\bar{v} \quad (3.7)$$

Velikost napětí U , jak nám ukazuje matematická analýza, je úměrné s průměrnou rychlostí, pokud je průběh symetrický kolem své osy. Tato úměra není pravidlem pro kapaliny, které mají newtonovský charakter a pro tekutiny, které mají magnetické částice. [1]

3.3 Vlastnosti kapaliny

3.3.1 Vodivost látky

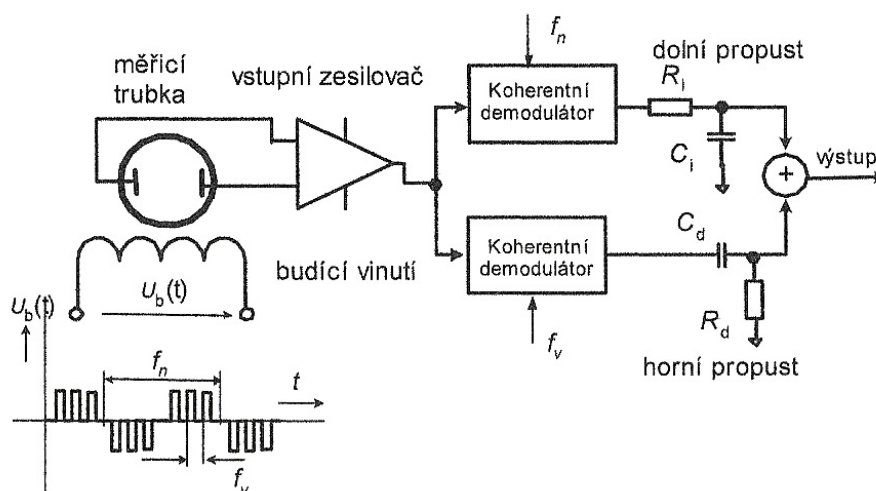
V tomto případě se zajímáme o vodivost kapaliny. Elektrická vodivost je způsob, jakým lze vyjádřit schopnost kapaliny vést elektrický proud. Stejně jako je to u vodičů, které jsou známé svou vodivostí. Například, že měděný drát je lepším vodičem než hliník. Některé kapaliny mají lepší vlastnosti proti ostatním. Důležité je podotknout, že se vyskytují kapaliny, které mají nulovou nebo velmi nízkou elektrickou vodivost, v tomto případě nelze indukčním průtokoměrem kapalinu měřit.

Běžné indukční průtokoměry pracují při vodivosti $\sigma = 5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ale minimální hranice se nachází na $\sigma = 0,1\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$. Například pitná voda má vodivost $\sigma = 200\mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$, lze snadno měřit, ale například benzín s vodivostí $\sigma = 10^{-8} \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ nebo deionizované vody indukčním průtokoměrem změřit nelze.

3.3.2 Kompenzace měrného odporu média

Obecně je měrný odpor roven převrácené hodnotě konduktivity (vodivosti). V běžné praxi se vlastnosti proudícího média nemění. Kompenzovat měrný odpor média můžeme použitím průtokoměru s magnetickým polem na dvou frekvencích.

Rušivá napětí, která pronikají do vstupu jsou menší a stálost nuly je lepší při nízkých kmitočtech magnetického pole. Pro dosažení rychlé odezvy a větší stálost nuly je výhodné použít k buzení součet signálů s vysokou a nízkou frekvencí. Podobně, jako je tomu u amplitudové modulace, kde nosná musí mít podstatně vyšší frekvenci než požadovaný přenášený signál. Na obrázku 3.2 je naznačen obvod, kde v jedné větvi je demodulován signál s nižší frekvencí. Ve druhé větvi je demodulován signál o vyšší frekvenci (nosná), která je použita pro buzení magnetického pole.



Obr. 3.2 Měřicí obvod pro průtokoměr s magnetickým polem na dvou frekvencích [1]

Při správné návaznosti amplitudových charakteristik dolní a horní propusti je součet těchto signálů z obou cest. Výsledek součtu signálů potlačuje pomalé složky rušení. Tyto složky jsou velice vyskytované pro měření průtoku média s vodivostí řádově $0,01 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dále při takto nízké vodivosti musí být vstupní odpor zesilovače extrémně veliký, takže rušivé signály snadno pronikají parazitními kapacitami od zdrojů rušení na vstup zesilovače. [1]

3.3.3 Rychlost proudícího média

Při měření indukčními průtokoměry je také důležitým parametrem rychlost, jakou se médium v potrubí pohybuje. Běžné průtokoměry pracují při rychlosti média přibližně od 1 m/s až 10 m/s. Některé průtokoměry mají výrobcem udávanou minimální rychlost 0,3 m/s. Pokud je rychlost média v potrubí nižší než minimální hodnota, která je stanovena výrobcem, průtokoměr stále měří, ale jeho přesnost se snižuje. Naopak při trvale vyšším průtoku kapaliny, než je uvedeno, dochází k rychlejšímu stárnutí měřidla. [5]

3.4 Stejnoseměrné průtokoměry

Jak už nám název napovídá jedná se o indukční průtokoměr, který je napájen stejnosměrným magnetickým polem. Stejnoseměrné magnetické pole má nesmírnou výhodu v jednoduchosti konstrukce. Pro buzení magnetického pole postačí obyčejný permanentní magnet, na němž se projeví i cena průtokoměru, která je až 4 krát nižší než cena u střídavého průtokoměru. [1]

Nicméně stejnosměrné magnetické pole, například použitím permanentního magnetu, přináší problémy se zpracováním malého stejnosměrného napětí. Hlavní nevýhodou je, že dochází k polarizaci elektrod a elektrolýze, při které se uvolňují nevodivé plyny. Tyto faktory zanášejí do měření chyby.

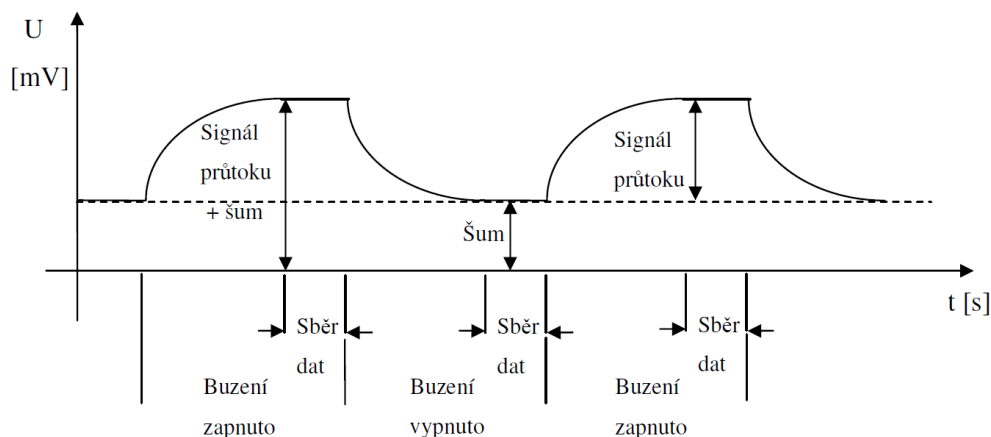
Chyby vzniklé při použití stejnosměrného magnetického pole lze odstranit například použitím pulzního magnetického pole, které je generováno pulzujícím napětím.

3.4.1 Impulsní stejnosměrné magnetické pole

Pro napájení se používají stejnosměrné spínací zdroje, které generují obdélníkový nebo lichoběžníkový průběh. Komutační spínače ke zdroji připojují cívku tak, aby se střídala polarita magnetické indukce s přibližně lichoběžníkovým průběhem. Tento způsob buzení je v terminologii indukčních průtokoměrů označován jako impulsní „stejnoseměrné“ magnetické pole. Frekvence spínání je určena tak, aby při obou polaritách vykazoval průběh magnetického pole dostatečně dlouhý úsek s konstantní hodnotou magnetické indukce B .

Stejnoseměrné indukční průtokoměry pracují na nižších frekvencích než průtokoměry střídavé, což má za následek pomalejší reakci průtokoměru. Obvykle se pohybuje frekvence od 3 Hz do 8 Hz, a to z důvodu eliminace šumu, který je přiváděn ze střídavého vedení. Frekvence však může dosahovat i cca 30 Hz. Signály na elektrodách obsahují indukované napětí, a zároveň šum, jak je znázorněno na obrázku 3.3. Při nulovém magnetickém buzení je na výstupu pouze šum. Při vybuzení magnetického pole je na výstupu měřený signál, ale i šum.

Od výsledného signálu je odečtena hodnota šumu a výsledkem je signál úměrný pouze průtoku kapaliny. Tímto se kalibruje nula a nadále není zapotřebí kalibraci provádět. [4][2]



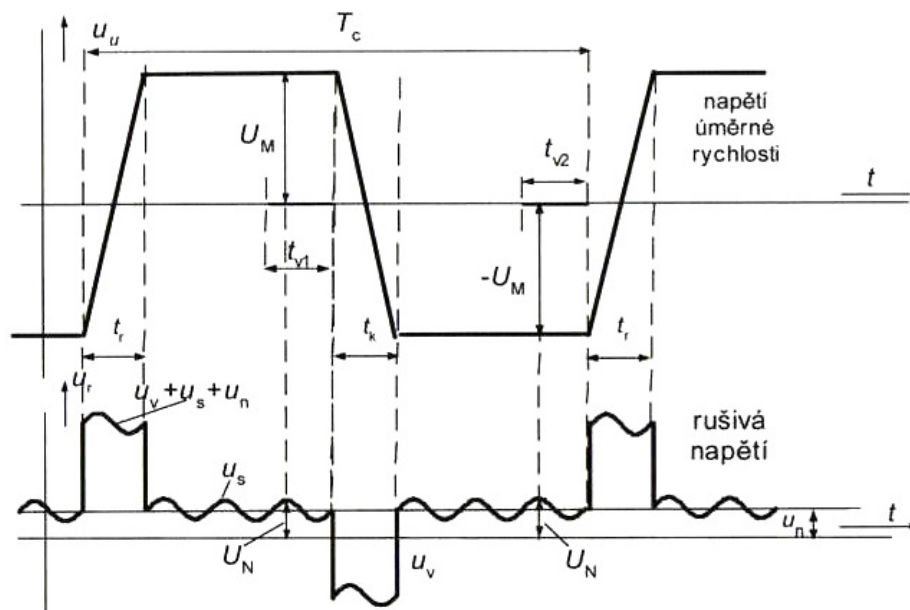
Obr. 3.3 Signály, které jsou na výstupu elektrod, obsahují indukované napětí a šum. Pokud je magnetické buzení cívek vypnuté, na elektrodách se vyskytuje pouze signál šumu. Při vybuzení magnetických cívek se signál skládá ze signálu průtoku a šumu. Odečtením těchto dvou hodnot získáme výsledný signál, který dosahuje vysoké přesnosti. [2]

Tyto průtokoměry jsou ideálními měřidly pro měření pulsací, což je rychlá změna rychlosti proudícího média. Nesmí být však zároveň požadováno měření průměrné rychlosti proudění. K případnému zpracování signálu je možné implementovat střídavé zesilovače. Zde ale nastává problém se střídavým rušivým signálem, který je nutný potlačit. Pro potlačení síťové frekvence je vhodné zvolit celočíselný násobek periody sítě a sjednotit průchod síťového napětí nulou se začátkem průběhu, jak je znázorněno na obrázku 3.4. Následnou integrací signálu můžeme vyloučit průnik napětí ze sítě. Navíc zde jsou nežádoucí vířivé proudy způsobené střídavým magnetickým polem v kapalině. Postačující proud pro napájení cívky je v rozmezí 0,1 až 0,25 A a potřebný výkon přibližně 24 VA. [1][2]

3.4.2 Průběh magnetické indukce B v podobě lichoběžníku

Lichoběžníkový průběh je vhodnější kvůli potlačení špiček napětí na elektrodách, které vznikají při obdélníkovém (strmém) průběhu. Při tomto průběhu lze odebírat vzorky napětí na elektrodách, kde je magnetická indukce konstantní a při odečítání vzorků je možné potlačit rušivá napětí u_n . V místech t_{v1} a t_{v2} získáme vzorky napětí jak v kladné, tak záporné půlvlně. Tím docílíme zdvojnásobení citlivosti a napětí U_n je potlačeno. Vše je znázorněno na obrázku 3.4, podle kterého platí [1]

$$(U_N + U_M) - (U_N - U_M) = 2U_M \quad (3.8)$$



Obr. 3.4 Užitečná $u_u(t)$ a rušivá $u_r(t)$ napětí při buzení stejnosměrným magnetickým polem a stálé hodnotě rychlosti proudícího média. Napětí příslušné vířivým proudům vzniká pouze při růstu (t_r) a poklesu (t_k) magnetického pole. V úsecích, kde $B(t) = \text{konst.}$ je na vstupu součet pomalu proměnné rušivé napětí u_n a průnik síťového napětí u_s . [1]

Při opakování průběhu jsou vzorky odebrány ze stejného místa půlplyny. Drift, což zde znamená kolísání nuly, je koherentním odebráním vzorku vyloučeného narozdíl od střídavých průtokoměrů, a tudíž není nutné nulování při nulovém průtoku. [1]

3.5 Střídavý průtokoměr

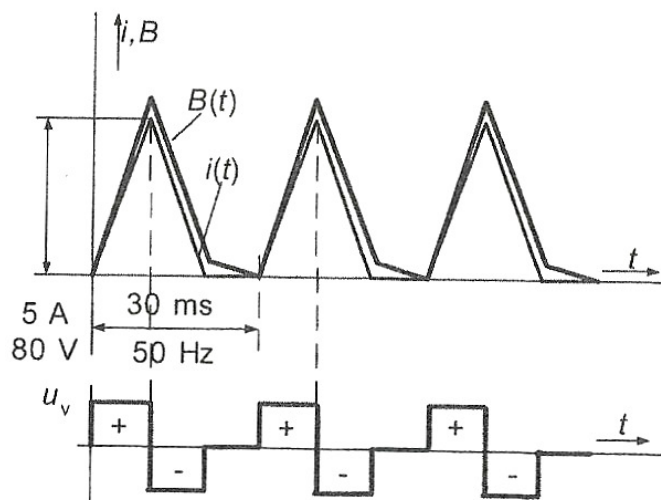
U komerčních střídavých průtokoměrů při frekvenci 50 Hz až 60 Hz se vytváří v kruzích magnetické pole při průtoku kapaliny v potrubí. Indukované napětí v kapalině je popsáno ve Faradayově indukčním zákoně. Standardní hodnota napětí U pro střídavý průtokoměr při 50 mm vnitřního průměru a průtoku 500 l za minutu je cca 2,5 mV. Historicky jsou střídavé průtokoměry nejběžněji používané, a to z důvodu snižujících se účinků na elektrodách. Obecně jsou tyto průtokoměry méně ovlivnitelné při průtoku různých druhů kapalin v potrubí. Tyto průtokoměry se nachází v mnoha aplikacích, kde se mohou uplatnit, například při měření krve. Miniaturní senzory umožňují měření na trubkách nebo cévkách o průměru 2 mm. V těchto případech se používá vyšší budicí frekvence než u průmyslových typů, mluvíme zde o frekvenci 200 Hz - 1000 Hz. Hlavní nevýhodou střídavého průtokoměru je, že silné střídavé pole indukuje rušivé střídavé signály při měření. To vyžaduje pravidelné nulování přístroje tak, že se zajistí nulový průtok (nulová rychlost) proudícího média. Nulování lze zajistit ručně nebo je nulování řešeno automaticky.

U střídavých průtokoměrů je nulování zapotřebí zajistit častěji než u průtokoměrů stejnosměrných. Dále se může vyskytovat v náročných průmyslových aplikacích kolísání napětí a frekvence v síti, což bude mít za následek rozdílnost proudů v magnetickém poli a bude docházet i ke kolísání výkonu šumu.

Nepatřičné kolísání magnetického pole lze omezit pomocí referenčního zdroje, který nám do obvodu bude stále dodávat napětí pro buzení průtokoměru. Dalším postupem k zabránění kolísání a šumu na elektrodách je speciální kabeláž a kalibrační postupy, které doporučují výrobci pro správné a přesné fungování měřicího přístroje. Obvykle jsou průtokoměry propojeny párem kabelů. Jeden kabel pro přívod napájení a druhý pro přenos signálu. Střídavé průtokoměry jsou provozovány na frekvenci 50, 60, ale i 400 Hz. Obecně platí, že tyto průtokoměry pracují na frekvenci od 10 Hz do 5 kHz. Vyšší frekvence jsou preferovány při určování okamžité hodnoty přechodových a pulzujících toků. Pro aplikace, kde je využíváno médium o dobré vodivosti nebo u tekutých kovů, musí být použito nízkých frekvencí, aby se zabránilo účinkům skinefektu. Naopak pro kapaliny s nízkou vodivostí nesmí být použito vysoké frekvence kvůli dielektrické relaxaci, která není okamžitá. [2]

3.5.1 Spínané střídavé magnetické pole

Střídavé magnetické pole je tvořeno připojením vinutí po dobu periody napájecí sítě ke zdroji proudu trojúhelníkového průběhu o intenzitě až 5 A, napětí na vinutí dosahuje až 80 V. Opakovací kmitočet je $2/3 \cdot 60 = 40$ Hz. Průběh proudu je sledován magnetickou indukcí se zpožděním řádově několik ms. Při lineárním nárůstu indukce B se indukují vířivé proudy a transformované napětí s přibližně pravoúhlým průběhem. Toto vytváří přibližně pravoúhlý průběh s amplitudou i polaritou odpovídající derivaci průběhu $B(t)$. Střední hodnota rušivých napětí po dobu budícího impulsu je dána integrací a je nulová. [1]



Obr. 3.5 Idealizované časové průběhy proudu $i(t)$ a magnetické indukce $B(t)$, při spínaném střídavém buzení trojúhelníkovým průběhem u_v , je napětí vzniklé vířivými proudy. [1]

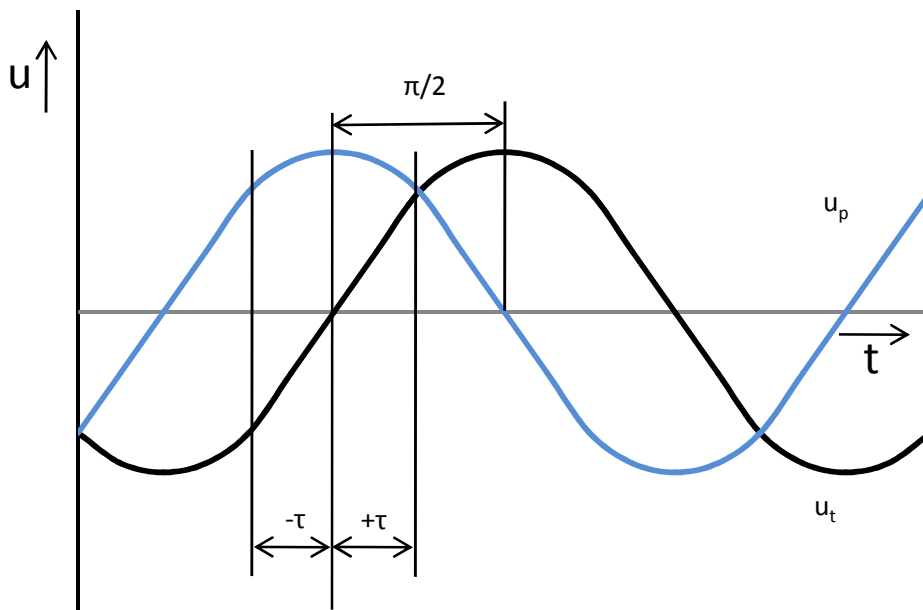
3.6 Rozlišení směru proudění

U indukčního průtokoměru se ve většině případů nerozlišuje směr proudění média, ale některé aplikace tuto možnost vyžadují. Směr proudění média lze často poznat ze způsobu připojení měřicího přístroje, jak je popisováno v kapitole 4 o instalaci průtokoměru.

Pro měření průtoku ve dvou směrech, například při proudění zleva doprava nebo naopak, je zapotřebí využít připojení měřicího přístroje, jak je znázorněno na obrázku 3.12.

Výrobce průtokoměrů vyznačuje na průtokoměru šipkou směr proudění. Pokud je průtokoměr správně nainstalován, výstupní napětí nabývá kladné polarity. Pokud dojde k opačnému proudění, výstupní napětí má zápornou polaritu. S tímto rozlišováním je spojeno mnoho problémů. Pokud je magnetické pole buzené impulsním napětím, kde se mění polarita magnetické indukce, je zapotřebí pomocí softwaru zpracovávat tyto impulsy pro vyhodnocení kladného či záporného napětí. S rostoucí frekvencí je toto snímání náročnější.

Klíčovací obvod spíná vstupní signál v intervalu $\langle \frac{\pi}{2} - \tau ; \frac{\pi}{2} + \tau \rangle$, kdy $\frac{\pi}{2}$ je fáze klíčovacího napětí u_t a τ je doba klíčování.



Obr. 3.6 Znárodnění určení směru proudění média v závislosti na polaritě napětí u_p . [10]

$$u = \int_{\frac{\pi}{2} - \tau}^{\frac{\pi}{2} + \tau} u_p dt \quad (3.9)$$

Pokud je napětí u_p podle obrázku 3.6 výsledné napětí je kladné, z čehož vyplývá směr proudění média, když napětí u_p je posunuto o 180° je výsledné napětí záporné, což značí opačný směr proudění média. [10]

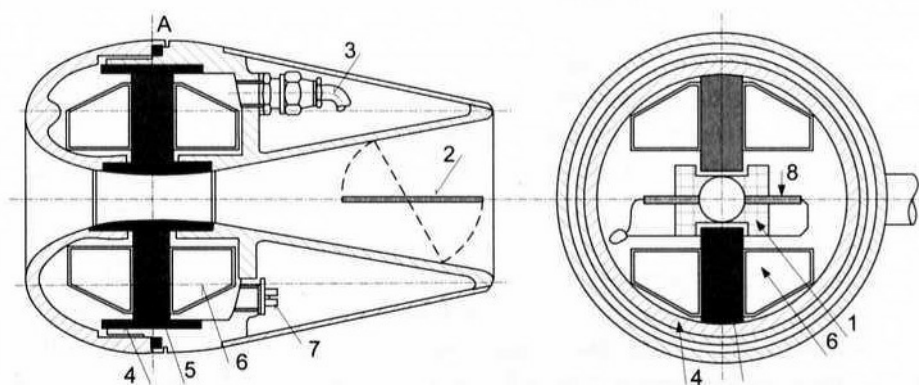
3.7 Rozdělení indukčních průtokoměrů

3.7.1 Průtokové

Průtokové indukční průtokoměry jsou nejběžněji používané a nejznámější. Zabývá se jimi převážná část této bakalářské práce. Průtokové průtokoměry lze rozdělit na průtokoměry s vodivou měřicí trubicí nebo naopak průtokoměry s nevodivou měřicí trubicí. Dále pak na průtokoměry se zaplněným potrubím nebo na průtokoměry s nezaplňným potrubím.

3.7.2 Ponorné

Ponorné průtokoměry jsou podobné průtokoměrům s nevodivým kanálem. Ponorné průtokoměry jsou vyrobeny a upraveny tak, aby se daly ponořit do měřené kapaliny. Na obrázku 3.7 je číslem (1) vyznačen magnetický obvod, který je umístěn uvnitř v utěsněném plášti (6). Tento plášť je naplněn izolačním olejem. Ponorný průtokoměr je konstruován tak, aby střední rychlost uvnitř trysky byla úměrná rychlosti proudění v měřené oblasti. Magnetický obvod je složený ze dvou jader (5), které jsou opatřeny vinutím, jež jsou magneticky spojena. Elektrody vyrobené z platiny (8) jsou instalovány na průměru kolmém na směr budícího pole, které má magnetickou indukci $B = 0,06 T$. Stíněný kabel se stará o propojení elektrod s měřícím obvodem. Uzavírací klapka (2) se nachází v zadní části trysky a je ovládána dálkově elektromagnetem, což zajišťuje snadné nastavení nuly. Velikost magnetického obvodu určuje budící pole, které je stanovené dovoleným oteplením vinutí. Zvýšení magnetické indukce při zachování malých rozměrů vyžaduje zmenšení vzduchové mezery magnetického obvodu. Toto má za následek nepřijatelné zúžení průtokového průřezu, a proto je nutné volit kompromis.



Obr. 3.7 Konstrukce ponorného indukčního průtokoměru [1]

3.7.3 Zásuvné

Zásuvné průtokoměry jsou konstruovány pro snímání osových složek vektoru rychlosti proudění média. Jejich velkou předností je měření průtoku bez přerušení procesu, jak je tomu při instalaci přírubového průtokoměru. Magnetický obvod u tohoto typu je otevřený a tvoří jej jádro a cívka. Magnetická indukce B se uzavírá vně trubky přes proudící kapalinu. Elektrody pro snímání jsou umístěné na nosné izolační trubce. V trubce mohou být až dva páry elektrod pro určení kolmé i podélné složky rychlosti. Díky válcovému tvaru vznikají za sondou turbulence, které mají za následek snížení nejistoty měření. [1]

3.7.4 Bodové

Bodový průtokoměr je určen a konstruován tak, aby mohl měřit rychlost proudícího média v malém prostoru. Výstupní napětí na elektrodách je závislé na vířivých proudech indukovaných magnetickým polem v kapalině, které jsou funkcí gradientu rychlosti a rozložení rychlostního pole v okolí místa měření.

3.7.5 Plošné

Plošný průtokoměr je využíván k měření vektoru plošného proudění za předpokladu homogenní rychlosti pole ve směru výšky kanálu. Magnetické pole H , především ve směru kolmém na směr proudění, vzniká průtokem střídavého proudu cívkou na dně kanálu. Platinové snímací elektrody jsou umístěny ve dvou na sebe kolmých směrech se vzdáleností mezi sebou, a zapojeny tak, aby bylo snímání mezi protilehlými body.

3.7.6 Průtokoměry pro nezaplňené potrubí

Tyto průtokoměry se liší od běžných indukčních průtokoměrů tím, že se zde implementuje více párů elektrod, které jsou rozloženy po obvodu potrubí. Jsou zde elektrody jako u zaplňeného potrubí a navíc se přidávají elektrody pro snímání výšky hladiny. Tyto elektrody jsou umístěny v horní části potrubí. Pomocí výšky hladiny napětí, úměrné rychlosti a tvaru protékaného potrubí, lze určit přibližně objemový průtok. Jiná varianta je pomocí měření hladiny prstencovými elektrodami kapacitního senzoru, umístěného v trubce a nespojeného vodivě s měřeným médiem. Výhodou tohoto snímání výšky hladiny je to, že hladina může poklesnout až na 10% plného průřezu. [1]

3.8 Všeobecné zásady pro výpočet nejistoty měření

3.8.1 Definice chyby

Chyba vzniklá při měření je rozdíl mezi naměřenou hodnotou a skutečnou hodnotou dané veličiny. Všechny měření fyzikálních veličin mají své nejistoty, které vznikají ze systematických chyb nebo z náhodných odchylek měření. Systematické chyby nelze minimalizovat četnějším opakováním měření, protože vznikají z charakteristik měřících přístrojů, průtokových charakteristik a způsobu montáže. Naopak náhodnou chybu lze minimalizovat opakovaným měření, protože náhodná chyba střední hodnoty n nezávislých měření je \sqrt{n} -krát menší než náhodná chyba samotného jednoho měření.

3.8.2 Definice směrodatné odchylky

Je-li proměnná X měřena vícekrát, přičemž tato měření jsou na sobě nezávislá, pak směrodatná odchylka s_x rozdělení n měření, X_i , je

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{X} - X_i)^2}{n-1}} \quad (3.10)$$

Kde \bar{X} je aritmetická střední hodnota n měření proměnné X ;
 X_i je hodnota zjištěná při i -tém měření proměnné X ;
 n je celkový počet měření hodnoty X

Pokud nejsou k dispozici opakovaná měření proměnné X , nebo je jich natolik málo, že přímý výpočet směrodatné odchylky na statickém základě se jeví jako nespolehlivý, a je možné odhadnout nejvyšší rozsah naměřených hodnot, pak lze směrodatnou odchylku pokládat za čtvrtinu maximálního rozsahu. Totožným způsobem se připouští, že systematická složka chyby smí být vyjádřena směrodatnou odchylkou, rovnající se polovině maxima kladné nebo záporné odchylky očekávaného rozsahu hodnot.

3.8.3 Definice nejistoty

Nejistota měření proměnné je definována dvojnásobkem směrodatné odchylky proměnné. Nejistota musí mít tento název a musí být vypočtena a uvedena tam, kde se uvádí, že měření je provedeno podle mezinárodní normy.

Po vyhodnocení směrodatné odchylky s_{qv} naměřeného průtoku q_v je nejistota e_{qv} dána vztahem

$$e_{qv} = \pm 2s_{qv} \quad (3.11)$$

Relativní nejistota E_{qv} je dána

$$E_{qv} = \frac{e_{qv}}{q_v} = \pm 2 \frac{s_{qv}}{q_v} \quad (3.12)$$

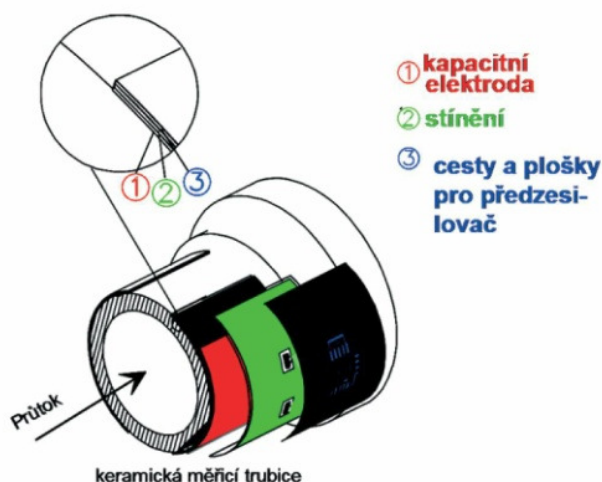
Výsledek měření průtoku musí být zaznamenán jednou z těchto norem

- Průtok = $q_v \pm e_{qv}$ (s 95% konfidenční pravděpodobností)
- Průtok = $q_v(1 \pm E_{qv})$ (s 95% konfidenční pravděpodobností)
- Průtok = q_v v mezích $\pm 100 E_{qv}\%$ (s 95% konfidenční pravděpodobností) [9]

3.9 Vlastnosti elektrod a nejistoty vzniklé při provozu průtokoměru

U převážné většiny indukčních průtokoměrů jsou měřící elektrody v přímém kontaktu s proudící kapalinou. Elektrody mohou být vyměnitelné, nebo pevně uložené. Pevné elektrody jsou vyráběny práškovou metalurgií, například spékáním kapky tekuté kapaliny s keramickou výstelkou. Při tomto procesu vzniká oxid hliníku a vznikne ucpávka. Tyto elektrody jsou levné, mají dobré vlastnosti v oblasti opotřebení a jsou necitlivé vůči ionizujícímu záření. Na elektrodě nevznikají dutiny, ve kterých by se usazovali bakterie, a proto jsou vhodné pro sanitární aplikace.

Využitím keramické výstelky vznikají nedostatky, jako je křehkost elektrod. Nejčastěji se využívá při měření průtoku kapaliny, která je rychle ochlazována nebo při měření vysokých teplot žíraviny. Při tomto použití je vhodné použít bezkontaktní elektrody.



Obr. 3.8 Konstrukce kapacitních elektrod a předzesilovače. [8]

Výstupní napětí je velkou měrou ovlivňováno proudící kapalinou, jak již bylo zmíněno. Musí splňovat minimální hodnotu vodivosti, rychlosti, atd. měřené kapaliny v potrubí. Na stěnách potrubí a na elektrodách se vytváří vodivé usazeniny, které nám způsobují chyby v měření. Vodivé usazeniny na elektrodách se při měření projeví jako zmenšení vzdálenosti elektrod od sebe. Toto vede ke snížení výstupního napětí. Druhou variantou usazenin jsou nevodivé usazeniny na elektrodách. Tyto dva nepříznivé vlivy na měření průtoku jen ojediněle působí proti sobě.

U vodivých usazenin může dojít k extrémnímu případu, kdy se spojí vodivá elektroda a zemnicí kontakt potrubí. Měřené potrubí je důležité čistit pro správnou funkci měřícího přístroje. Velmi slabé vodivé povlaky usazenin v měřeném potrubí lze odstranit pravidelným připojováním napětí o hodnotě cca 10 V mezi elektrodou měřící a zemnicí.

U nevodivých usazenin, které vznikají na elektrodách, například díky usazování tuku v potravinářském průmyslu, může dojít ke snížení vodivosti (stínění), což má za následek snížení napětí. V extrémních případech je výstupní napětí na elektrodách rovno nule.

Usazeniny v potrubí a hlavně na elektrodách lze částečně odstranit. Zvýšení rychlosti měřeného média je jedním ze způsobů, jak zabránit usazování nečistot, nebo u výměných elektrod vyměnit elektrody, aniž by byl proces ukončen. I mechanické čištění je možné v jistých intervalech, nebo s neustálým působením. Ve většině případů je zapotřebí ukončit proces měření, vyjmout průtokoměr a vyčistit. Pro tyto případy je možné využít obtočné potrubí, aby se nemusela zastavit dodávka média.

Nejen usazeniny zanášejí do měření nejistoty. Chyby měření může způsobit také špatné umístění průtokoměru, nebo médium, které obsahuje větší počet plynových bublinek. Nad 5% obsahu bublin v celkovém objemu jsou tyto účinky výrazné. Tyto nežádoucí účinky lze omezit polohou měřeného potrubí, například vertikální polohou a mícháním. Při větší velikosti bublin, které dosahují velikosti měřící elektrody, dochází ke zvýšení objemového průtoku a tím se zvýší výstupní hodnota měřidla. [1]

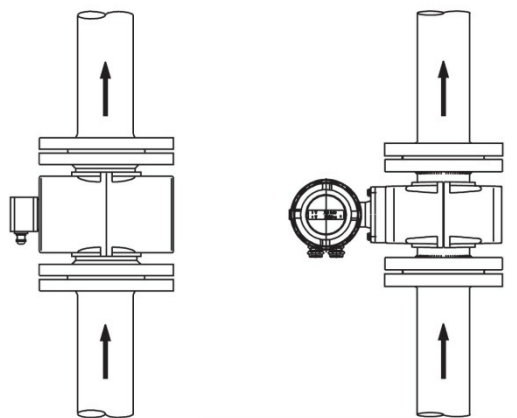
U současných indukčních průtokoměrů a průměru potrubí pod 8 palců se používá bezkontaktní snímání. V konstrukci bezkontaktního snímání se jako elektrody používají kovové vrstvy, které se nacházejí mezi vrstvami materiálu, ze kterého je vyrobena vložka. Vložky jsou keramické. Takovéto průtokoměry mohou měřit tekutiny, které mají 100 krát menší vodivost než u běžného indukčního průtokoměru. Bezkontaktní snímání je vhodné pro měření tekutin, kde se v potrubí usazují povlaky usazenin. [5]

Při měření průtoku dvou kapalin v jednom potrubí je důležité znát jejich vodivost. Rozdíl ve vodivosti kapalin lze eliminovat tím, že kapaliny před průtokoměrem důkladně smícháme dohromady. Míchač kapalin může být napevno umístěn před měřícím orgánem. Pokud bychom kapaliny důkladně nesmíchali, výstupní signál by byl velice zatížen šumem.

4 Instalace průtokoměru

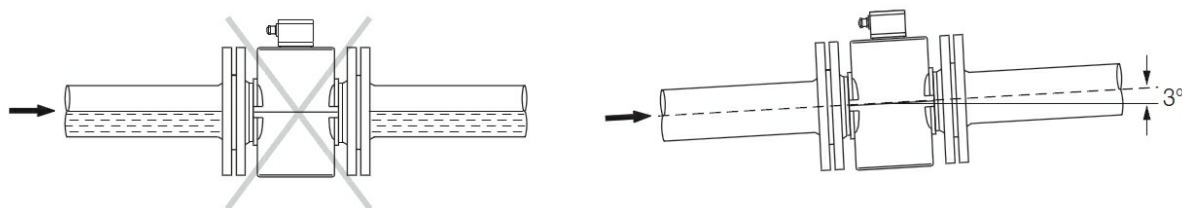
Indukční průtokoměry potřebují pro svou správnou činnost plně zaplněné potrubí. Při instalaci průtokoměru je zapotřebí dodržení určitých pravidel. Jednou z hlavních zásad pro správné a bezchybné měření průtoku je správné zvolení polohy měřícího přístroje. Poloha měřícího přístroje je důležitá z hlediska vzniku plynových kapes, nebo dokonce aby nedošlo k poklesu hladiny média v potrubí pokud se nejedná o průtokoměry pro nezaplňená potrubí.

Nejvýhodnějším umístěním měřícího přístroje je svislá poloha a to tak, že proudící médium má směr z dole nahoru. Při této instalaci za normálních podmínek (tekoucí vodivé médium) je v zásadě nemožné, aby došlo k poklesu hladiny a tím k chybovosti měření.



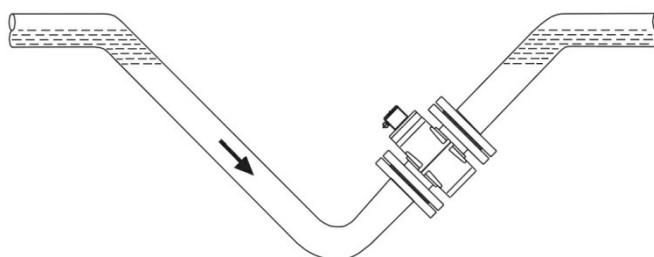
Obr. 3.9 Instalace svislého průtokoměru [6]

Instalování indukčních průtokoměrů ve vodorovné poloze je možné tehdy, jeli průtokoměr nainstalován v nejnižším bodu potrubí. Měřící elektrody nesmějí být na horní straně potrubí. Důvodem je nežádoucí styk elektrod s plynem. Při využití varianty, že měřič bude implementován v nejnižší části potrubí, je celý systém náchylnější na usazování nečistot, zvláště při měření kalu. Zde je vhodné při odstavení provozu vyjmout měřící systém a při provozu je důležité kontrolovat, a průběžně čistit elektrody. Vodorovné potrubí pro měření průtoku by mělo mít minimální stoupání 3° jak je znázorněno na obrázku 3.10. [6]



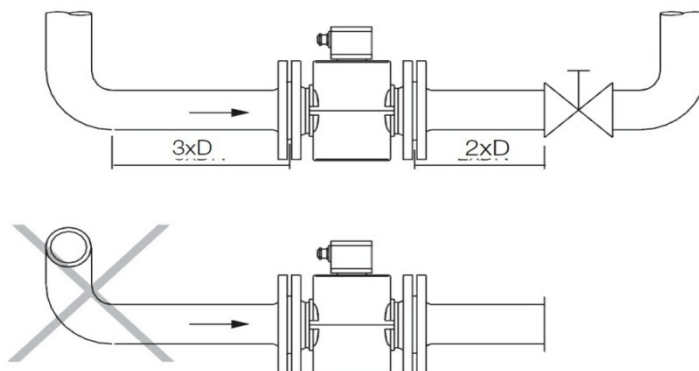
Obr. 3.10 Instalace vodorovného průtokoměru [6]

Na následujících obrázcích jsou znázorněny různé možnosti montáže pro eliminaci vzniku vzduchu, nebo i jiné plynové kapsy. Všechny průtokoměry využívají principů popsaných u vodorovných a svislých možností montáže.



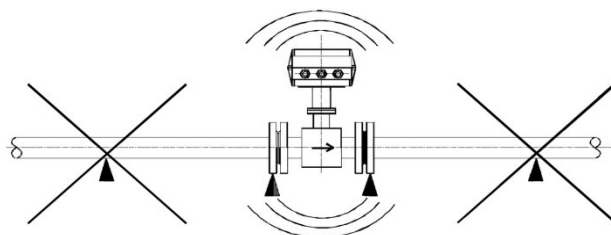
Obr. 3.11 Jedna z možných instalací vodorovného průtokoměru [6]

V případě potrubí na obrázku 3.12 je zapotřebí dodržet určitých vzdáleností před měřícím členem a za měřícím členem. Minimální vzdálenost rovného potrubí před průtokoměrem musí splňovat trojnásobek průměru potrubí. Za měřidlem musí být minimální hodnota délky potrubí dvojnásobek průměru potrubí. Pokud je v potrubí více rušivých vlivů poblíž měřícího přístroje, jako například koleno, je zapotřebí uklidňovací rovina. Tato vzdálenost je rovna rušivým prvkům vynásobeným průměrem potrubí. Tyto vzdálenosti zajistí nejen správnou funkčnost průtokoměru v dané přesnosti, ale také v oblasti opotřebení a celkové životnosti měřících přístrojů. Nejvíce opotřebovanou částí je vstupní výstelka průtokoměru. Proto je možnost implementace ochranné výstelky, která chrání před abrazivními účinky proudícího média. [1][6][7]



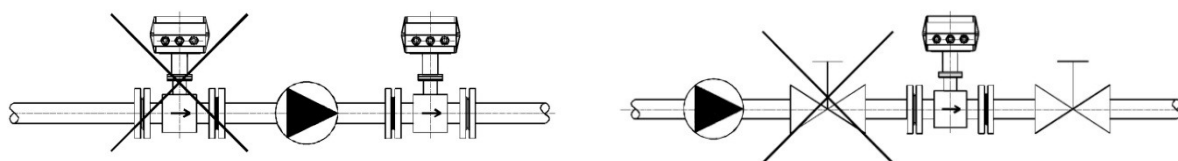
Obr. 3.12 Jedna z možných instalací vodorovného průtokoměru [6]

Pokud je potrubí ve vodorovné poloze, na kterém je aplikovaný měřič delší více než 90 metrů, je zapotřebí potrubí na obou koncích průtokoměru podepřít. Tímto se zabrání vzniku vibrací a případného poškození snímače nebo chybovosti měření. [6]



Obr. 3.13 Podpření indukčního průtokoměru pro eliminaci vibrací [7]

Jestliže je médium v potrubí poháněno čerpadlem, musí se měřidlo umístit vždy za čerpadlo. Tímto se zabrání vzniku podtlaku, který by mohl snímač poškodit. Pro správnou funkci je důležité dodržet vzdálenost mezi průtokoměrem a čerpadlem pětadvacetinásobek průměru potrubí. Ze stejných důvodů se uzavírací armatury umísťují vždy za měřidlo (viz obrázek 3.14). [7]

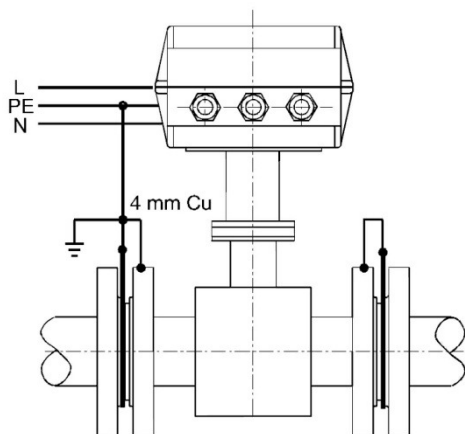


Obr. 3.14 Instalace čerpadla nebo uzavěru potrubí [7]

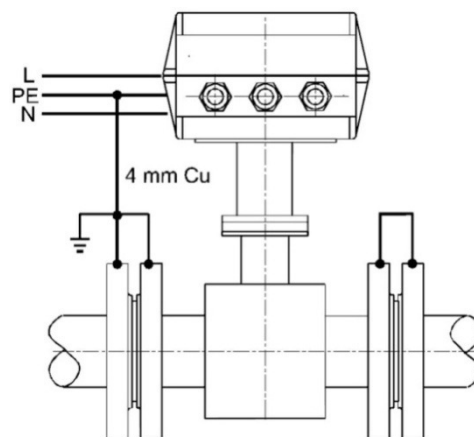
Při instalaci indukčního průtokoměru je důležité jeho uzemnění. Průtokoměr vytváří část vodivé cesty pro bludné proudy, které je zapotřebí eliminovat při proudění v kapalině nebo potrubí. Uzemnění je provedeno před měřidlem i za ním. Tímto se docílí toho, že při měření jsou proudy zkratovány, ale nenarušují dané měření. Při špatném uzemnění bludné proudy způsobují u výstupního napětí posunutí nuly, a tím dochází k chybovosti měření.

Uzemnění může být provedeno u vodivého potrubí vodivými páskami, kdy vodivé potrubí je v kontaktu s proudící kapalinou. U nevodivého nebo u vyloženého potrubí je uzemnění řešeno pomocí vodivého kroužku. Tento kroužek má podobný tvar jako clonový kotouč. Otvor v kotouči je rovný vnitřnímu průměru potrubí. Jak u vodivého, tak u nevodivého potrubí se uzemnění přidává před a za měřící člen. U nevodivého potrubí je kotouč vložen mezi trubici průtokoměru a potrubí. Zde dojde ke spojení zemnicích podložek a protékajícího média. Zemnicí pásky nebo podložky jsou pevně spojeny s dobrým vodičem, kterým může být například potrubí studené vody. [6]

Pro využití zemnicích kroužků u většiny rozměrů potrubí a u neobvyklých exotických materiálů je velice nákladné. Kroužky lze nahradit levnější variantou. Jednou z možných a levnějších variant je přidání do potrubí jednu (třetí) elektrodu, která uzemní bludné proudy. Jinou variantou pro uzemnění proudící kapaliny je použití umělé hmoty k vyrobení kroužku. Do tohoto kroužku je přidána kovová elektroda.

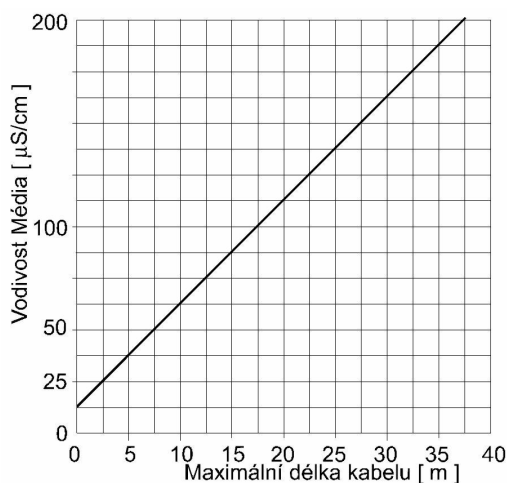


Obr. 3.15 Uzemnění pomocí zemičích kroužků [7]



Obr. 3.16 Uzemnění pomocí příruby [7]

Měřidlo může být v provedení kompaktním, což znamená, že snímač a převodník signálu je již vnitřně zabudován a připojen. Měřidlo může být také v provedení s oddělením snímače a převodníku. U tohoto druhého provedení je nutné propojení kabelem. U odděleného průtokoměru je nejlepší umístění převodníku co nejbližší snímači. Maximální délka propojovacího kabelu by neměla přesáhnout 25 metrů. Jeli snímač i převodník provozován v prostředí, ve kterém je silné magnetické rušení, volíme vzdálenost co nejmenší. Délka kabelu je závislá také na vodivosti proudícího média (viz na obrázku 3.17). [7]



Obr. 3.17 Znáznornění maximální délky kabelu v závislosti na vodivosti měřeného média. [7]

5 Nabídka průtokoměrů

5.1 Indukční bateriový průtokoměr COMAC CAL FLOW 45, DN32

Tento průtokoměr v bateriové verzi byl vyvinut speciálně pro potřeby umístění do prostor, kde není k dispozici napájecí napětí a je nutno toto řešit bateriovým napájením.

Průtokoměr vyniká vysokou přesností v celém rozsahu průtoku. Je osazen bezdotykovým tlačítkem při celkovém krytí měřiče IP 67. Jeho nasazení je ideální na vodovodních řádech, kanalizacích či různých stokách a všude tam, kde je potřeba použít měřič bez vnitřních pohyblivých částí a tedy s nutností bateriového napájení.



Hlavní přednosti:

- napájení z interní lithiové baterie
- možnost použití různých materiálů trubíc (dle média) a přípojných koncovek (dle příslušných norem)
- velmi pevná konstrukce
- jednoduchá a bezproblémová instalace a obsluha
- téměř bezúdržbový provoz
- trubice odolné vůči působení vakua
- libovolně volitelné impulsní číslo a výběr sledovaného registru
- vysoká odolnost proti abrazi, zvláště pak při použití keramické měřicí trubice
- použití konektoru M12 pro snadné a rychlé elektrické připojení
- vysoká odolnost proti nečistotám

Obr. 3.18 indukční průtokoměr [11]

Popis funkce:

Před každým měřením probíhá automatická diagnostika veškerých funkcí a součástí nutných ke správnému odměření. Na základě výsledků je pak měřič případně schopen identifikovat prázdné potrubí a celé měření zrušit, anebo naopak vyhodnotit směr proudění a výsledek započítat do sumárních registrů. Měřič je vybaven třemi registry. Hlavní registr V1 je metrologický a shlukuje v sobě data v metrologicky schváleném rozsahu průtoku. Druhým je registr V2, do kterého se kumulují průtoky v širším rozsahu než metrologickém, ale data jsou naměřená v pásmu se stále velmi dobrou přesností. Třetím registrem V3 je zaznamenáván objem protečený obráceným směrem, tedy reversní objem. Impulsní výstup je volně konfigurovatelný nejen co se týče impulsní konstanty, ale i čísla registru V1-V3, který má být sledován. Zároveň měřidlo stále sleduje stav baterie a dostatečně dlouho dopředu upozorňuje obsluhu na nutnost její výměny. Veškerá data jsou zálohována v interní paměti pro případ výměny baterie nebo výpadku napájení. Vybíjení baterie je přímo závislé na zvolené periodě měření.

Pokud je nastavena na 10 sekund, je životnost při standardně dodávaných bateriích minimálně 10 let, pokud se ovšem sníží na 6 sekund, klesne na 6 let. Proto je důležitá správná volba frekvence měření. Měřič je vybaven LCD displejem, který se aktivuje zmáčknutím (zastíněním) tlačítka. Po krátkém testu displeje již probíhá běžné zobrazování jednotlivých hodnot s možností jejich listování.

GSM modul:

Ve spojení s interním GSM modulem je tento měřič schopen periodicky posílat zprávy s informací o protečeném objemu kapaliny. Díky tomu je pak možno velmi účinně analyzovat naměřená data ze sítě a po jejich prošetření určit místo úniku. Zároveň může takové stahování dat vést ke snížení nákladů na vlastní provádění odečtů. Vyvedený anténní konektor nenarušuje krytí celého měřidla.

Po dohodě s výrobcem je možné nabídnout i jiné varianty měřičů (jiné DN) dle požadavků zákazníka.

Součástí dodávky je - vyhodnocovací jednotka; čidlo průtoku; kalibrace; zemnicí vodiče; montážní manuál; montážní šrouby; těsnění
Cena tohoto průtokoměru je cca 46 670,- Kč s DPH

Cena indukčního průtokoměru je orientačně dle internetových obchodů od 13 000,- Kč s DPH sahajících až do částky 178 870,- Kč s DPH k datu 25. 6. 2011. Cena průtokoměru je závislá na vnitřním průměru průtokoměru (údaj v katalogu ND) čím větší průměr tím vyšší cena. [11]

Závěr

V mé bakalářské práci jsem se zabýval měřením průtoku. Je zde naznačeno jakým způsobem správně vybrat průtokoměr vzhledem k měřenému médiu, je zapotřebí zvážit mnoho faktorů. Po přečtení této práce čtenář získá obecné znalosti pro měření průtoku. Podstatou této práce je měření průtoku za pomoci indukčních průtokoměrů.

První část mé bakalářské práce obsahuje seznámení s měřenou veličinou. A jsou zde popsány základní definice, které jsou základem pro funkčnost popisovaných průtokoměrů.

V druhé části mé bakalářské práce je popsán způsob měření průtoku média. Průtokoměry jsou rozděleny do několika skupin. V každé skupině jsou uvedeny nejběžněji používané průtokoměry, kde je vysvětlen princip činnosti. Nachází se zde rozdělení senzorů průtoku a přehledná tabulka pro rychlé určení vhodného průtokoměru v závislosti na typu měřeného média. Z této kapitoly vyplývá, že průtokoměr, který by dokázal změřit průtok všech skupenství a jiných vlastností média neexistuje. Je vždy nutné znát prostředí, ve kterém bude měřicí přístroj provozován.

V následující kapitole je podrobně popsán indukční průtokoměr. V první části je popsán princip, na kterém tento průtokoměr pracuje. Čtenář je seznámen se základním rozdělením indukčních průtokoměrů, a dále je popisována problematika s vlastnostmi proudícího média a správné montáže. V této části práce jsem především řešil kompenzaci měrného odporu média, plynových kapes, nejistoty měření, rozlišení směru proudění a správnou montáž měřidla. Vodivost dané kapaliny, což je převrácená hodnota měrného odporu, je dána vlastnostmi měřeného média. Tyto vlastnosti mohou změnit přidáním vodivé kapaliny, kterou může být například solný roztok nebo vhodným zapojením a zpracováním signálu z měřících elektrod. Nejistoty měření mohou vznikat například usazováním nečistot na stěnách potrubí a především na samotných snímacích elektrodách. Tento jev lze popisovanými metodami v mé práci eliminovat, ale bohužel úplné zamezení usazování nečistot vyloučit nelze. Praxe ukazuje, že je zapotřebí průtokoměr vyjmout, vyčistit pokud nemá vyměnitelné elektrody. Rozlišení směru proudění je řešeno softwarově za pomoci polarit napětí, které je na výstupu měřících elektrod. Tvorba plynových kapes je řešena správnou instalací měřidla. Pokud je dodrženo postupů při instalování průtokoměru, jak je popsáno v této kapitole, je výskyt plynové kapsy ojedinělý. Závěrem podotknu, že správné fungování měřícího přístroje je, pokud jsou dodrženy podmínky provozu dané výrobcem.

Poslední část poukazuje na příklady nabízených indukčních průtokoměrů na internetu. Jsou zde popsány parametry a podmínky, ve kterých je měřicí přístroj schopen měřit. Jako zajímavost jsem uvedl přibližnou cenu daného průtokoměru.

Indukční průtokoměry jsou hojně využívány a jejich rozvoj jde stále dopředu. Dokážeme jimi měřit širokou škálu tekutin o různé rychlosti a viskozitě proudění média. Je zde především podmínka minimální vodivosti kapaliny, aby byla zajištěna správná funkce měřícího přístroje. Pro většinu měření jsou využívány především průtokoměry stejnosměrné, tedy magnetické pole je buzeno stejnosměrným lichoběžníkovým tvarem napětí.

Studijní literatura a zdroje

- [1] ĎAĎO, Stanislav; BEJČEK, Ludvík; PLATIL, Antonín. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vydání. Praha: BEN - Technická literatura, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X.
- [2] WEBSTER, John G. *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton : CRC Press, c1999. 1 sv. (v různém stránkování) : il. ISBN 0-8493-8347-1.
- [3] KADLEC, Karel. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. Říjen 2006, 10, [cit. 2011-06-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100605.pdf>>.
- [4] ĎAĎO, Stanislav. Měřicí obvody indukčních průtokoměrů (část 1) : Měřicí obvody indukčních průtokoměrů (část 1). *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. Listopad 2005, 11, [cit. 2011-06-15]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30787>.
- [5] Měření průtoku & měření výšky hladiny. *Zpravodaj* [online]. 1111, 4, [cit. 2011-06-13]. Dostupný z WWW: <http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_4.pdf>.
- [6] Electromagnetic Flowmeter FXE4000 5. *ABB* [online]. 2004, [cit. 2011-06-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.wisnercontrols.com/pdfs/Abb%20pdfs/FXE4000%20manual.pdf>>.
- [7] Indukční průtokoměr FLOMAG-ICM : Návod k použití. *Flomag* [online]. [cit. 2011-06-13]. Dostupný z WWW: <http://www.flomag.cz/data/files/Flomag-ICM%20Manual%20CZ_6_cz.pdf>.
- [8] KOMP, Petr. MĚŘENÍ PRŮTOKU EMULZÍ, ROZTOKŮ, SUSPENZÍ A KAŠÍ S NÍZKOU VODIVOSTÍ MAGNETICKO- -INDUKČNÍMI PRŮTOKOMĚRY KROHNE. *Chemagazín* [online]. 2011, 2, [cit. 2011-06-13]. Dostupný z WWW: <http://www.chemagazin.cz/userdata/chemagazin_2010/file/CHEMAGAZIN_XXI_2_c118.pdf>.
- [9] ČSN EN ISO 6817. Praha: Český normalizační institut, 1997. 24 s.
- [10] Podklady k přednáškám z předmětu Měření neelektrických veličin.
- [11] *E-cerpadla: Indukční bateriový průtokoměr COMAC CAL FLOW 45, DN32* [online]. [cit. 2011-06-25]. Dostupné z WWW: <<http://www.e-cerpadla.cz/indukcni-bateriovy-prutokomer-comac-cal-flow-dn32-p-6572.html?model=F45DN32PN25>>.