

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Pedagogická fakulta – Katedra fyziky

Konstrukce a realizace měřiče rychlosti proudu kapaliny

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. PaedDr. Petr Adámek, Ph.D.

Autor: Martin Holub

Anotace

Tato práce seznamuje se základními principy měření průtoku nebo rychlosti proudu kapalin. Práce obsahuje analýzu, na jejímž základě byl vybrán vhodný princip měřiče rychlosti proudu a bylo navrženo technické řešení na mechanickém principu. Hlavní částí práce je praktická realizace měřiče rychlosti proudu vody, určeném k měření rychlosti proudu v různých hloubkách v definované vzdálenosti ode dna.

Abstract

This work describes key-stones of measurement of the flow of velocity of the flux of liquid media. The work includes the analysis which was resource for chosing suitable principle of measurer of current velocity and there was suggested technical solution based on mechanical principle. The main part of the work is practical realization of measurer of current velocity of the stream of water in variable depth i.e. at the defined distance from channel bed.

Prohlašuji, že předloženou práci jsem vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedené literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách.

V Radomicích dne 14. listopadu 2008

.....

Martin Holub

Touto formou děkuji svému konzultantovi p. doc. PaedDr. Petru Adámkovi, Ph.D., za cenné rady a připomínky při zpracování mé práce.

OBSAH

1 Úvod a cíle práce.....	7
2 Teoretický úvod.....	8
2.1 Bernoulliho rovnice.....	8
2.2 Laminární a turbulentní proudění.....	10
2.3 Mezní vrstva.....	12
2.4 Viskozita.....	14
3 Průtok dvoufázové tekutiny a kavitace.....	15
3.1 Dvoufázové tekutiny.....	15
3.2 Kavítace.....	17
4 Rozdělení senzorů průtoku.....	17
4.1 Průtokoměry využívající rychlostní metody (rychlostní).....	18
4.2 Požadavky na snímače průtoku a průtokoměry.....	19
5 Principy rychlostních průtokoměrů.....	22
5.1 Průtokoměry pracující na principu tlakového rozdílu.....	22
5.2 Průtokoměry se škrtkými orgány.....	22
5.3 Turbinové průtokoměry.....	22
5.4 Fluidikové průtokoměry.....	24
5.5 Ultrazvukové průtokoměry.....	24
5.6 Elektromagnetické průtokoměry.....	26
5.7 Tepelné průtokoměry.....	27
5.7.1 Termoanemometry.....	28
5.7.2 Kalorimetrické průtokoměry.....	29
5.8 Značkové průtokoměry.....	30
5.9 Pitotova trubice.....	31
5.10 Prandtlova trubice.....	32
6 Volba principu pro realizaci.....	33
7 Konstrukce turbinového měřiče rychlosti proudu.....	33
7.1 Princip funkce měřiče rychlosti proudu.....	33
7.2 Schéma zapojení.....	34
7.3 Popis způsobu připojení systému k počítači.....	34
7.4 Detailní popis použitých elektronických komponent.....	35

7.4.1 Čidlo.....	35
7.4.2 Rezistor R1.....	36
7.4.3 Kondenzátor 10n	36
7.4.4 Rezistory R2 a R3.....	36
7.4.5 Časovač NE555.....	36
7.4.6 Panelové měřidlo HD-3428.....	38
8 Fotodokumentace.....	39
9 Závěr.....	40
10 Seznam literatury.....	41
11 Příloha	42

1. Úvod a cíle práce

Mezi hlavní cíle práce patří seznámení s problematikou měření rychlosti proudu kapaliny, plynu, případně jiných médií. Dalším cílem je analyzovat princip a postup měření rychlosti proudu vody o malé rychlosti, řádově cm s^{-1} . Na základě této analýzy zvolit vhodný princip měření rychlosti proudu a vyvinout měřicí systém. Tento systém pak realizovat a o život, případně kalibrovat.

Schopnost měřit rychlost proudu libovolného média se dá využít například k určení průtočného množství. Touto problematikou se zabývali již staří Egypťané a Sumerové [1, 2], žijící na březích řek, jež byly zdrojem závlah při pravidelných záplavách.

Rozsah použití měření rychlosti proudu využívané v průtokoměrech je velmi široký: Od měření průtoku krve, až po měření rychlosti proudu nebo průtoku řek nebo mořských proudů.

Nejširší je měření rychlosti proudu, respektive průtoku různých médií, uplatněno v rychlostních průtokoměrech. Proto je následující text zaměřen převážně na rychlostní průtokoměry a jejich principy. Z těchto principů je možno zvolit ten nejvhodnější pro prosté měření rychlosti proudu, například proudící vody.

Ve světě jsou vyráběny a distribuovány průtokoměry určené k rozmanitým účelům, s velkým rozsahem průtoku – od $0,1 \text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ do $5000 \text{l} \cdot \text{s}^{-1}$ [3]. Rozmanitost pracovních podmínek průtokoměrů je neobyčejně široká, to jak z hlediska složení a vlastností měřených látek (od čistých tekutin až po agresivní třífázové směsi), rozsahu teplot proudícího média, tak i rozsahu tlaků proudící tekutiny (od vakua do několik tisíců barů).

Měření průtoků dále komplikuje nutnost respektovat vlastnosti kanálů, v nichž tekutina proudí (uzavřené potrubí nebo otevřené kanály, vlastnosti stěn potrubí apod.).

S rozvojem výpočetní techniky se projevuje silný odklon od průtokoměrů založených na tradičních mechanických principech k metodám převádějícím neelektrickou veličinu na elektrickou výstupní veličinu (indukční, ultrazvukové, tepelné).

2 Teoretický úvod

V následujícím textu jsou uvedeny pouze vybrané kapitoly z hydrodynamiky, případně aerodynamiky, úzce se týkající měření průtoku v závislosti na rychlosti proudu.

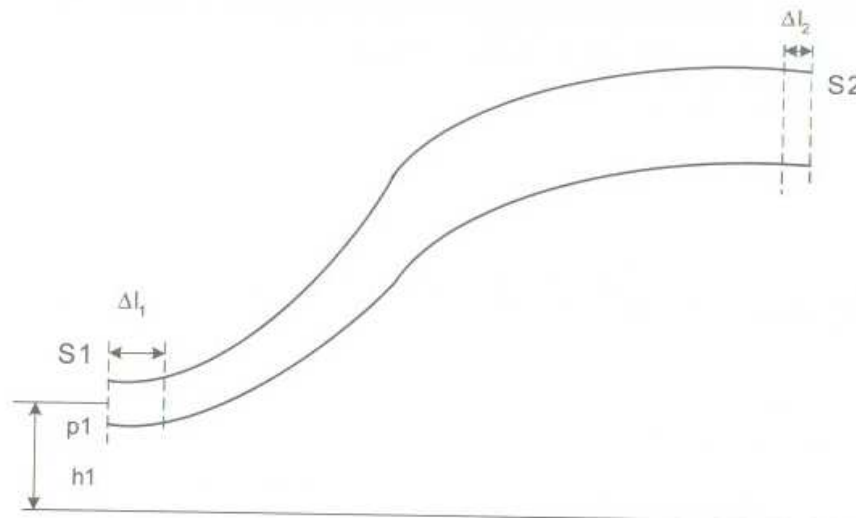
2.1 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice [3] popisuje energetické poměry při proudění tekutin a představuje aplikaci zákona o zachování energie na proudící tekutinu. Základním předpokladem její platnosti je nestlačitelnost tekutiny (*rovnice kontinuity*) a rovnoměrné rozdělení rychlosti po průřezu potrubí, jak je tomu při turbulentním proudění. Uvažujme energetický stav sloupce tekutiny nacházejícího se v časovém okamžiku t mezi místy potrubí o průřezech S_1 a S_2 (obr. 1). Průtok (pohyb) tekutiny je důsledkem působení tlakové síly F vyvolávající posuv tekutiny v libovolném místě průřezu potrubí o element dráhy ds . Posuvem je vykonána práce $F \cdot ds$ odpovídající energii

$$dE = F \cdot ds. \quad (1)$$

Pro tlakovou sílu platí

$$F = pS. \quad (2)$$



Obr. 1 K odvození Bernoulliho rovnice, dle [3].

Tlak v tekutině p může být považován za hustotu energie, tj. energii v jednotce objemu

$$p = \frac{F \cdot ds}{S \cdot ds} = \frac{\text{energie}}{\text{objem}} = \frac{W}{V}. \quad (3)$$

Po aproximaci elementárního úseku dráhy ds malým konečným přírůstkem Δl je rozdíl energií mezi průřezy S_1 a S_2 vyvolaný rozdílem tlaku roven

$$\Delta E_{(1)} = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2. \quad (4)$$

Dále je nutné zahrnout potenciální energii odpovídající různosti nadmořských výšek h_1 a h_2 místo S_1 a S_2

$$\Delta E_2 = mgh_1 - mgh_2, \quad (5)$$

kde m je hmotnost tekutiny mezi S_1 a S_2

g je tíhové zrychlení

Jde tedy o rozdíl hydrostatických tlaků.

Celkový rozdíl energie tekutiny mezi místy S_1 a S_2 je popsán vztahy

$$\Delta E = \Delta E_{(1)} + \Delta E_{(2)} = p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 + m \cdot g \cdot (h_1 - h_2),$$

$$p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 + m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{1}{2} m \cdot (v_1^2 - v_2^2), \quad (6)$$

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{g} - m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{1}{2} m \cdot (v_1^2 - v_2^2).$$

Je-li rozdíl energií $\Delta E = 0$, tekutina se nepohybuje. Pro $\Delta E > 0$ se tekutina pohybuje vpravo a pro $\Delta E < 0$ vlevo. Rychlost pohybu tekutiny v lze určit na základě zákona o zachování energie z kinetické energie pohybující se tekutiny

$$\Delta E = \frac{1}{2} m v_1^2 - \frac{1}{2} m v_2^2. \quad (7)$$

Hmotnost m lze vyjádřit pomocí hustoty ρ

$$m = \rho S_1 \Delta l_1 = \rho S_2 \Delta l_2. \quad (8)$$

Na základě zákona o zachování energie platí

$$p_1 S_1 \Delta l_1 - p_2 S_2 \Delta l_2 + m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = \frac{1}{2} m \cdot (v_1^2 - v_2^2). \quad (9)$$

Po dosazení za m dostáváme

$$(p_1 - p_2) \frac{m}{\rho} - mg(h_1 - h_2) = \frac{1}{2} m \cdot (v_1^2 - v_2^2). \quad (10)$$

Podělením výrazem m/ρ a seskupením členu dostáváme rovnice

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2, \quad (11)$$

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{const.}$$

Hustota energie na vstupní a výstupní straně potrubí je tedy stejná, jak bylo možné očekávat z principu zachování energie.

Obecný tvar těchto vztahů, tj.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h_1 = \text{const.}, \quad (12)$$

při uvažování tlaku P jako hustoty energie je znám jako Bernoulliho rovnice (švýcarský vědec Daniel Bernoulli, 1783).

Část Bernoulliho rovnice pro $v = 0$ definuje statický tlak

$$p_{\text{stat}} = p + \rho g h, \quad (13)$$

jehož součástí je hydrostatický tlak

$$p_h = \rho g h. \quad (14)$$

Analogicky pro dynamický tlak platí

$$p_{\text{dyn}} = \frac{1}{2}\rho v^2. \quad (15)$$

Celkový tlak P_t (hustota energie) je určen vztahem

$$P_t = p_{\text{stat}} + p_{\text{dyn}}. \quad (16)$$

Jako Bernoulliho jev je označováno zmenšení tlaku v místech zvýšené rychlosti průtoku. Jak je patrné z Bernoulliho rovnice, lze měřením dynamického tlaku získat údaj o rychlosti proudění v [3]. Na tomto základě pracují senzory průtoku se škrťacími orgány (kap. 5.1).

2.2 Laminární a turbulentní proudění

Důležitým kritériem používaným pro posouzení druhu proudění je Reynoldsovo číslo Re , udávající poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině [4]. Pro kruhové potrubí o světlosti D je Reynoldsovo číslo Re_D definováno vztahem (17)

$$Re_D = \frac{\rho v^2 D}{\eta v} = \frac{\rho v D}{\eta} = \frac{v D}{\nu}, \quad (17)$$

kde η je dynamická viskozita tekutiny [Pa.s]

ν je kinematická viskozita tekutiny [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]

Pozn.: Označení D v indexu vyjadřuje, že Reynoldsovo číslo je vztaženo k průměru potrubí D .

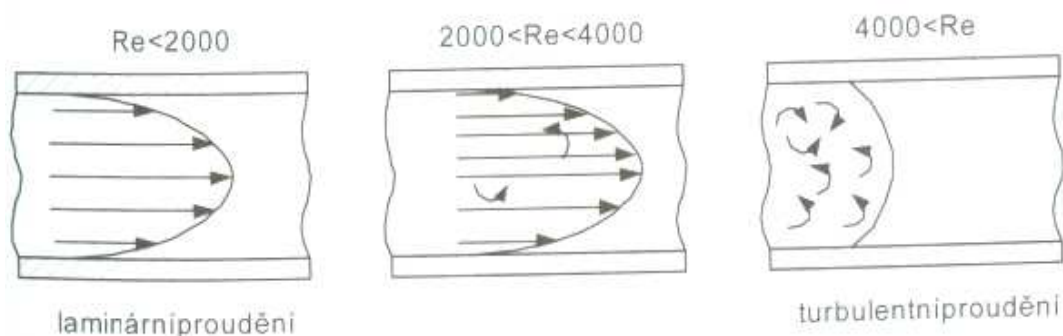
Pro dynamickou viskozitu platí

$$\eta = \nu \rho. \quad (18)$$

Druhý člen na pravé straně rovnice (18) se používá u kapalin, jejichž kinematická viskozita závisí pouze na teplotě. Třetí člen se používá u plynů, u nichž je kinematická viskozita funkcí tlaku a teploty. Kritické Reynoldsovo číslo Re_{Dkrit} určuje hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro kruhové potrubí je teoretická hranice $Re_{Dkrit} = 2320$. Je-li $Re_D < 2320$, jedná se o laminární proudění. Při $Re_D > 2320$ jde o proudění turbulentní. Ve skutečnosti je v okolí Re_{Dkrit} určitá přechodová oblast uvedená na obr. 1, s asymetrickým nerovnoměrným rychlostním profilem, ve které nelze o druhu proudění jednoznačně rozhodnout. Pro ilustraci uveďme, že Reynoldsovo číslo průtoku krve cévami živého organismu je asi 2000 [5].

Jak ukazují výsledky počítačového modelování z posledního období, přechod z laminárního do turbulentního proudění se neděje postupně. Toto byl chybný předpoklad asi do roku 1970. Jak se ukázalo, turbulentní proudění může za jistých podmínek vzniknout náhlým skokem. Na rozložení (profilu) rychlosti v potrubí mají značný vliv tzv. *hydrodynamické poruchy*, které jsou způsobené odlišnostmi vlastností ideálně hladkého a přímého potrubí od skutečných různě tvarovaných a na vnitřních stěnách nerovných potrubí.

Funkce průtokoměru, respektive měření rychlosti proudu je tedy zásadně ovlivněna druhem proudění tekutiny v potrubí. Povaha proudění je závislá na rozložení třecích a setrvačných sil v tekutině.



Obr. 2 Ukázka závislosti typu proudění na Reynoldsových číslech, dle [3].

Při *laminárním* proudění převládá účinek třecích sil mezi navzájem se nemíchajícími vrstvami proudící tekutiny. Částice tekutiny se pohybují po drahách, které se navzájem nekříží. Rychlost proudění je rozdělena parabolicky s největší rychlostí v ose potrubí viz obr. 1 a nejmenší rychlosti na místě styku hraničních vrstev s vnitřními stěnami potrubí, kde jsou podle očekávání účinky třecích sil největší. Vzniká tak tzv. *úplně vyvinutý* rychlostní profil ve tvaru

rotačního osově symetrického paraboloidu. Laminární proudění je typické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění.

Při **turbulentním** proudění dochází ke křížení drah částic tekutiny, vytváří se víry a chaotický pohyb tekutiny neprospívající k průtoku. Ke zvýšení průtoku je nutné podstatné zvýšení tlaku. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil je plochý. Fluktuace tlaku při turbulentním proudění má za následek vyzařování akustické energie tekutiny – proud v potrubí se stává hlučným a tento hluk se přenáší potrubím i dalšími konstrukcemi na velké vzdálenosti. Tohoto jevu se využívá ke generování akustických signálů při testování metodami **akustické emise** (hledání netěsností tlakových nádob, kontrola těsnosti kulových uzávěrů a ventilů apod.) [6].

Ke vzniku turbulentního proudění dochází také při míchání dvou nezávislých toků, například v případě clony může míchání proudu hlavním otvorem s jiným proudem vstupujícím malým otvorem v cloně nebo i v jejím blízkém okolí vést ke vzniku turbulentního proudění.

2.3 Mezní vrstva

Tenká vrstva tekutiny přiléhající k povrchu obtékaného tělesa, v níž na pohyb tekutiny má výrazný vliv viskozita [4], má specifické vlastnosti a je označována jako **mezní vrstva**. Pro mezní vrstvu je typický velký rozdíl rychlosti proudění - od nulové hodnoty v blízkosti stěn potrubí (obecně obtékaného tělesa - tekutina ulpívá na povrchu tělesa) - až po rychlost vnějšího nerušeného proudu.

Mezní vrstva má důležitý význam při měření průtoku, jelikož základní části mnoha průtokoměrů jsou umístěny právě v mezní vrstvě nebo v její blízkosti. Jde např. o průtokoměry s tlakovou diferencí, kdy senzory tlakové difference leží ve stěně potrubí.

Obdobně je tomu s uložením elektrod indukčního průtokoměru a piezoelektrickými měniči ultrazvukových průtokoměrů. Vlastnosti mezní vrstvy podstatně ovlivňují i chování turbínových průtokoměrů, jelikož mezní vrstva zde představuje mezeru mezi konci lopatek a stěnami turbíny.

Jak je znázorněno na obr.3, je u náběžné hrany tělesa (vtok do potrubí) tloušťka mezní vrstvy teoreticky nulová, vzniká zde smykové napětí a částice jsou v klidu. Tloušťka mezní vrstvy d roste se vzdáleností od vtoku a proudění v ní má laminární charakter.

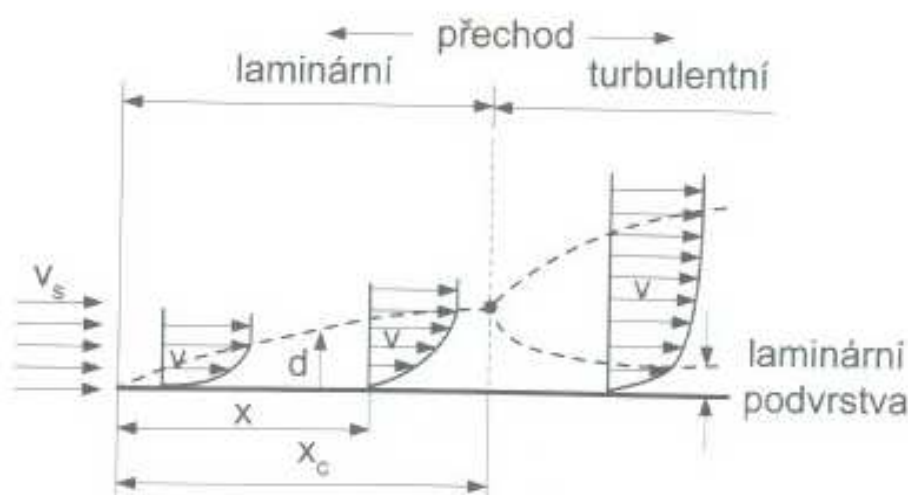
V jisté kritické vzdálenosti X_c dosahuje hodnota d maxima, mezní vrstva je nestabilní a nad laminární spodní vrstvou vzniká oblast turbulentního proudění s plně vyvinutým rychlostním profilem. Hodnota kritické vzdálenosti X_c závisí drsnosti stěn potrubí a úrovní

turbulencí v tekutině. Za určitých podmínek dochází v jistém místě povrchu k odtržení proudu (*bod odtržení*) [4, 5]. Této skutečnosti se využívá pro návrh tvaru překážek u vírových průtokoměrů.

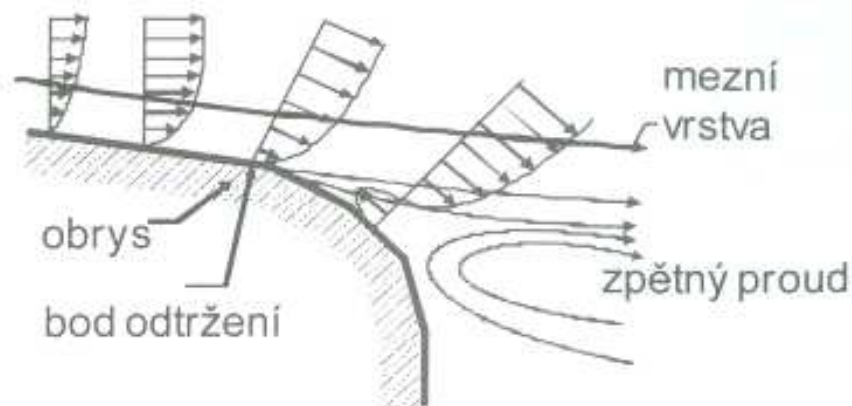
Charakter proudění v mezní vrstvě a její tloušťka jsou důležité pro leteckou techniku, jelikož ovlivňují aerodynamické charakteristiky obtékaného tělesa. V letecké technice se poloha bodu odtržení ovládá odsáváním, vyfukováním nebo štěrbinou. S vlastnostmi mezní vrstvy úzce souvisí Coandův jev. Tento jev byl objeven rumunským leteckým inženýrem Henri-Marie Coandou (1886-1972) v období kolem r. 1900.

Velmi zjednodušeně řečeno, jde o tendenci proudící tekutiny (kapaliny nebo plynu) přilnout k povrchu a sledovat tvar povrchu. Vysvětlení jevu není jednotné - jedna z hypotéz se opírá o účinky třecích sil (*skin friction* - plášťové tření) [6] vznikajících při proudění na styku povrchu tekutiny a pevného objektu. Třením se zmenšuje rychlost proudění, třecí síly pak přitahují tekutinu k povrchu a způsobují, že se přilepí k povrchu, sleduje jeho tvar a ohýbá se i kolem rohu.

Např. tekutina vytékající z trysky sleduje zakřivený povrch objektu umístěného poblíž trysky. Pokud úhel mezi povrchem a proudem není příliš ostrý, proud sleduje povrch objektu i "za roh". Účinkem Coandova jevu může dojít k opětovnému přilnutí mezní vrstvy po jejím odtržení, nebo také k přilnutí dvou proudů tekutiny. Coandova jevu se mimo jiné využívá také ke konstrukci fluidikových průtokoměrů [6].



Obr. 3 Vznik mezní vrstvy na povrchu desky nebo stěny potrubí dle [3].



Obr. 4 Odtržení proudu v zadní části obtékaného objektu [3].

2.4 Viskozita

Viskozita je vlastnost reálné tekutiny, která způsobuje vznik nenulového smykového napětí mezi dvěma sousedními vrstvami tekutiny pohybujícími se různou rychlostí. Smykové napětí je důsledkem vazebních sil mezi molekulami tekutiny a proto nucený pohyb tekutiny vyvolává přidavné vnitřní síly nebo vnitřní tření. Jednoduchý případ existence rozdílu rychlostí pohybu jednotlivých vrstev tekutiny je znázorněn na obr. 5.

Smykové napětí mezi jednotlivými vrstvami je pak dáno vztahem (19)

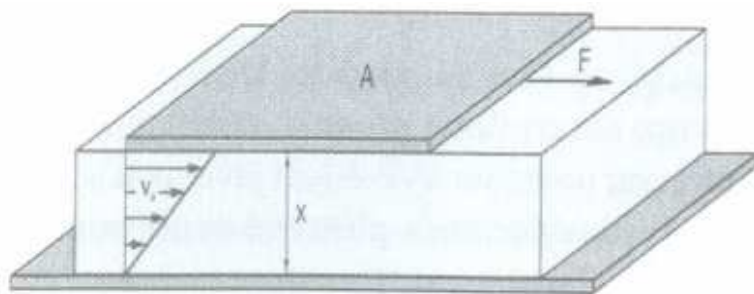
$$\frac{F}{A} = \tau = \eta \frac{dv}{dx} . \quad (19)$$

Tekutina se pohybuje mezi pevnou stěnou a deskou o ploše A pohybující se účinkem síly F rychlostí v . Gradient rychlosti podél tloušťky proudící tekutiny dv/dx vzniká proto, že rychlost tekutiny v těsné blízkosti stěny je nulová zatímco těsně pod pohyblivou deskou dosahuje hodnoty v a je úměrné gradientu rychlosti podél průřezu tekutiny. Konstanta úměrnosti η je nazývána *dynamickou* nebo také *absolutní viskozitou* [6]. Jednotky používané pro vyjádření dynamické viskozity jsou P (Poise), cP, (centipoise), Pa.s, Ns.m⁻². Pro převod jednotek platí 1 cP = 1 mPa.s.

Jiným, s viskozitou úzce souvisejícím pojmem, je kinematická viskozita ν definovaná jako podíl

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} , \quad (20)$$

kde ρ je hustota tekutiny.



Obr. 5 Rozdíl rychlostí proudu způsobený různou viskozitou [6].

Viskozita má zásadní význam při měření průtoku, jelikož společně s místní rychlostí, polohou v potrubí a drsností stěn určují profil rychlosti v potrubí. Viskozita plynu je podstatně menší než kapalin a také její účinek na proudění je ve srovnání s kapalinami menší. Při proudění plynu se naopak více projevují účinky tlaku a teploty jak přirozeně plyne z jejich stlačitelnosti.

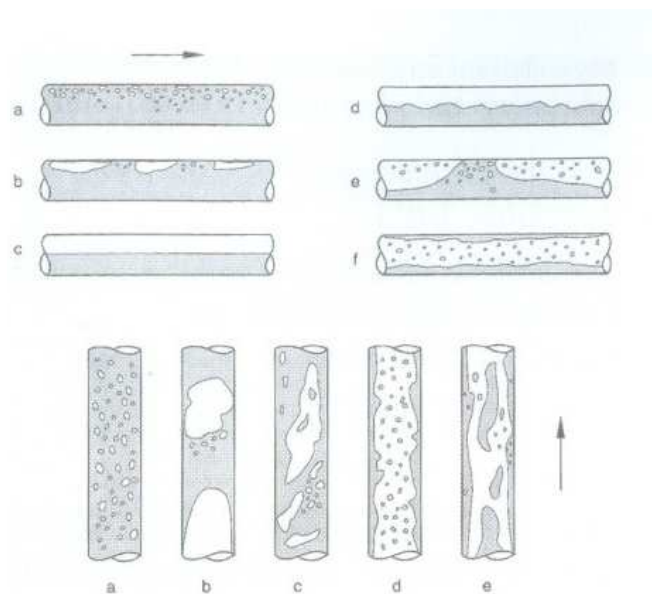
3 Průtok dvoufázové tekutiny a kavitace

Pro získání základní představy, jak se problematika měření rychlosti proudu komplikuje je uveden popis proudění dvoufázové tekutiny.

3.1 Dvoufázové tekutiny

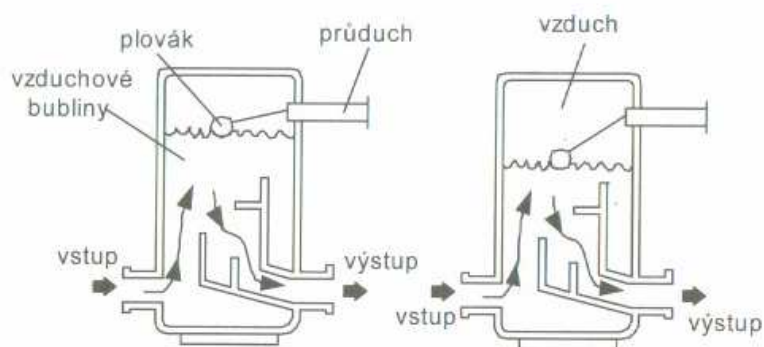
V mnoha praktických situacích se vyžaduje měření průtoku nemísitelných tekutin (např. olej a voda) nebo směsí kapalina-částice pevné látky [7]. Převážná většina průtokoměrů je navržena pro práci s jedinou fází. Proto pokud při proudění tekutin zůstávají obě fáze (tj. složky kapalina-plyn) při nízkých rychlostech odděleny, mohou při měření průtoku vzniknout závažné chyby. Charakter proudění dvoufázových tekutin závisí na řadě činitelů, především na poměru objemových koncentrací fází, orientaci potrubí, rychlosti průtoku, viskozitě a dalších faktorech.

Rozdílnost chování dvoufázových tekutin je ilustrována na tvarech obrazců průtoku (hranic mezi kapalnou a plynnou fází) vznikajících za různých podmínek v horizontálně a vertikálně orientovaných potrubích viz obr. 6.



Obr. 6 Průtok dvou fází tekutiny v horizontálně a vertikálně orientovaném potrubí při rostoucí koncentraci plynné fáze [8]. a) bubliny, b) kapsy, c) vrstvy, d) zvlněné rozhraní, e) olejové skvrny, j) prstence [7].

Obrazce, vznikající při rostoucí koncentraci plynné fáze, pozorované při vertikální a horizontální poloze měřící trubky se značně liší. Některé tvary rozhraní jsou typické pro vlhkou páru, (např. obr. 6). Přítomnost plynné fáze se zpravidla nejvíce projeví u průtokoměry využívajících Coriolisova principu, průtokoměry se škrťícími orgány zůstávají funkční i když nejistota měření se může zvýšit. K odstranění plynné fáze (vzduchových bublinek) se užívá odvzdušňovače, jehož princip je znázorněn na obr. 7. Tekutina se po dobu dostatečnou k úniku plynné složky udržuje v nádobě (rezervoáru). Uvolňování plynu má za následek pokles hladiny a plovákový hladinoměr otevře výpustní ventil, odvádějící plyn ven z nádoby. Pak se odvzdušněná kapalina přivádí účinkem tlakového převýšení zpět do potrubí.



Obr. 7 Princip odvzdušnění kapaliny dle [9].

Přítomnost pevné fáze (částic) v kapalině (kašovitě látky) nezpůsobuje vážné ohrožení činnosti průtokoměru, zejména tolerantní jsou indukční průtokoměry, většina ultrazvukových a průtokoměry deformační (s terčíkem). Preferována je vertikální montáž měřicí trubky.

Při aplikacích je nutné vzít v úvahu zkušenost, že chyby způsobené přítomností fáze, pro kterou nebyl průtokoměr navrhnout mohou dosáhnout hodnot až 50 %.

3.2 Kavitace

Kavitací se označuje náhlý vznik plynné fáze v prostředí kapalně fáze [9]. Vzniká místním náhlým poklesem tlaku v proudící kapalině. Za určitých okolností je kavitace doprovázena lokální tvorbou kavitačních dutin, tj. bublinek plynu nebo páry. Kavítaci lze předejít udržováním tlaku v kapalině P_k na hodnotě určené empirickým vztahem:

$$p_k = 2\Delta p_{\max} + 1,25p_v, \quad (21)$$

kde ΔP_{\max} je spád tlaku na turbině při maximálním průtoku

P_v je absolutní tlak par při maximální teplotě

V průtokoměrech může kavitace vzniknout u kapalin s velkým obsahem plynu při náhlém poklesu tlaku (např. při průtoku clonou nebo místem s prudkou změnou průřezu). Průvodními jevy kavitace jsou silný ohřev, vibrace, vznik elektrického proudu, silný hluk a porušení povrchu obtékaných částí v místě, kde dochází k zániku bublin plynu popř. páry (lopatky vodních turbín, čerpadel).

Materiál trvale odolný proti kavitační erozi doposud nebyl objeven.

4 Rozdělení senzorů průtoku

V senzorech průtoku dochází k transformaci měřené veličiny - průtoku na jinou (měronosnou) fyzikální veličinu jednoznačně funkčně závislou na rychlosti proudění tekutiny nebo na její kinetické energii [3] viz obr. 8. V současnosti je nejčastěji touto měronosnou veličinou veličina elektrická, nejčastěji napětí nebo proud.

Přímé měření objemového nebo hmotnostního průtoku (tj. měření podle definičních vztahů) je možné dávkovacími senzory, rozdělujícími tekutinu na přesně definované díly a transportujícími je ve směru proudění. Základem konstrukce těchto senzorů jsou odměrné nádoby, které se kinetickou energií proudící tekutiny samočinně střídavě plní a vyprazdňují.

Dalším typem přímých průtokoměrů jsou průtokoměry založené na vážení jisté části protékající látky. Používá se jich zejména pro měření proteklého množství pevných látek.

Většina měření je nepřímých a vychází ze závislosti výstupní veličiny průtokoměru na kinetické energii nebo rychlosti proudící tekutiny.

Senzory proudění - průtokoměry lze také klasifikovat podle měřené veličiny (objemový nebo hmotnostní průtok).

Průtoky v otevřených kanálech (nezaplňených potrubích) vyžadují specifické metody, jelikož na rozdíl od uzavřeného potrubí proudí tekutina proměnným průřezem. Zvláštní požadavky jsou kladeny na průtokoměry pro použití v medicíně a příbuzných oborech (průtok sanitárních tekutin).

Vzhledem k tomu, že práce je zaměřena převážně na měření rychlosti proudu, jsou zde zpracovány především rychlostní průtokoměry, respektive jejich principy.



Obr. 8 Rozdělení průtokoměrů dle [3].

4.1 Průtokoměry využívající rychlostní metody (rychlostní)

Průtokoměry využívající principu rychlostního měření se dělí na [3, 4, 6]:

- průtokoměry s *konstantním průtočným průřezem*, u nichž je měřítkem průtoku okamžitá střední rychlost proudění a které současně tvoří většinu provozních průtokoměrů (škrticí orgány, ultrazvukové, indukční, turbínové apod.);
- průtokoměry s *konstantní střední rychlostí proudění*, u nichž je měřítkem průtoku velikost průtočného průřezu, (plovákové průtokoměry - rotametry a jejich modifikace).

Mechanických účinků *kinetické energie* proudící tekutiny využívají průtokoměry deformační, objemové a gyroskopické. Gyroskopické průtokoměry pracují s rotujícím potrubím a spolu s prvními konstrukcemi Coriolisových průtokoměrů jsou málo užívané a zastaralé. Pro praxi mají z této skupiny v současné době největší význam průtokoměry objemové. Proto se ujalo dělení průtokoměrů na *rychlostní* a *objemové*. Pro některé aplikace může být užitečné třídění senzoru průtoku podle charakteru výměny energie mezi senzorem a proudící tekutinou. Pak senzory průtoku, jejichž funkce je podmíněna odčerpáváním energie z tekutiny, se označují jako senzory *energie spotřebovávající (extrahující - EE)*. U těchto senzorů se energie pohybující tekutiny předává pevnému nebo pohyblivému čidlu senzoru ponořenému do tekutiny. Senzory průtoku, které při svojí činnosti přidávají energii do tekutiny, jsou označovány jako *energie přidávající(EA)* [6].

Přidaná energie může mít různou formu, např. ultrazvukového nebo elektromagnetického vlnění, příp. tepelného záření. Senzory typu EE obecně vzato více ovlivňují měřenou tekutinu, jelikož mohou měnit charakter proudění a rychlostní profil. Vykazují proto větší tlakové ztráty a pro správnou funkci vyžadují zařazení dostatečně dlouhých přímých úseku potrubí před a za senzorem. Množství a charakter přidané energie v senzorech EA nezpůsobuje výraznější změny rychlostního profilu proudící tekutiny a tlakové ztráty průtokoměru jsou minimální. Nejsou nutné úseky potrubí usměrňující proudění. Senzoru typu EA je menšina a dovolují měření v situacích, kdy senzory typu EE jsou nepoužitelné, např. bezdotykové měření příložnými ultrazvukovými průtokoměry [6].

4.2 Požadavky na snímače průtoku a průtokoměry

Při výběru vhodného snímače je nutné respektovat mnoho různých vlivů, z nichž z technického hlediska patří k nejvýznamnějším např.:

- *pracovní činnost* - spojitá, nespojitá; jednorázová, trvalá, laboratorní, provozní;
- *druh a vlastnosti a hodnoty parametrů měřené tekutiny* - kapalina, pára, plyn; agresivita; hodnoty teploty, tlaku, viskozity, hustoty, apod.;
- *měřicí místo a jeho parametry* - potrubí, otevřený kanál, jejich rozměry a jiné parametry, přístupnost, náběhové délky atd.;
- *rušivé vlivy senzoru*- trvalá tlaková ztráta, časové zpoždění údaje;
- *způsob indikace* - zobrazení nebo zápis, místní nebo dálkový, analogový nebo digitální, tisk, ukládání do paměti;

- *vyhodnocení*-průtoku nebo proteklého množství objemového nebo hmotnostního, parametry tekutiny, předvolba, signalizace;
- *přesnost(nejistoty)měření*- bez korekcí nebo s korekcemi;
- *možné opotřebení* (mechanických dílů) a nestálost (vlastností, hodnot parametru),
- *dynamické vlastnosti* (časová konstanta, zpoždění).

Nejistoty měření jsou určeny principem senzoru [5], zejména jeho primárního členu (čidla). Zvláště vysoké jsou nároky na nejistoty měření průtoku pro bilanční měření (např. měřiče tepelného výkonu a odebraného tepla) a vedou vždy k přísnějším kritériím a tím i k větším pořizovacím nákladům. Dosažitelnou přesnost měření výrazně omezují parametry tekutiny (např. tlak, teplota) a jejich změny. Za cenu zvýšení nákladu lze i pro extrémní parametry tekutiny realizovat průtokoměry s minimálními hodnotami nejistot. Podstatný je přitom výběr principu senzoru průtoku. Některé funkční principy senzoru lze použít např. pouze při měření průtoku vodivých tekutin (např. indukční snímače) a jiné jsou naopak vhodné pro všechny druhy tekutin.

Důležitý je také **tvar výstupního signálu** senzoru [10, 11]. Např. senzory, jejichž výstupní veličinou je změna frekvence, jsou odolné vůči amplitudovému rušení výstupního signálu a navíc dovolují jednoduchou integraci výstupní veličiny (určení celkového protečeného množství) čítačem.

Rušivý vliv průtokoměru na měřený systém se projeví tím, že instalací se změní hydraulické poměry v systému. Jde především o hydraulický odpor (vlivem trvalé tlakové ztráty snímače), změnu dynamických vlastností měřeného systému apod. Některé typy průtokoměrů (zejména průřezové) vyžadují určité vlastnosti měřících tratí (průměr potrubí, uklidňující potrubí před a za primárním členem - čidlem průtokoměru, svislé nebo vodorovné potrubí apod.).

Dynamické vlastnosti průtokoměru jsou velmi důležité při měření nebo regulaci pramenného průtoku, např. při dávkování.

Spolehlivost funkce senzoru a tím i jeho dlouhodobá provozuschopnost jsou do značné míry dány použitým fyzikálním principem. Z tohoto hlediska jsou výhodné senzory bez pohyblivých částí. Spolehlivost je velmi důležitá především v těch případech, kdy je výměna poškozeného snímače velmi obtížná nebo zcela nemožná (např. provozy s ionizujícím zářením).

Pro ilustraci, co vše je nutné zvážit při volbě průtokoměru, jsou uvedeny následující body [3, 6]:

Vlastnosti měřené tekutiny

- typ tekutiny (kapalina, plyn, pára)
- potrubí zaplněné, nezaplněné nebo otevřený kanál
- pracovní tlak tekutiny
- pracovní teplota tekutiny
- hustota tekutiny
- viskozita tekutiny
- stlačitelnost tekutiny
- chemické vlastnosti
- abrazivní tekutina
- přítomnost pevných částic
- tekutina vícefázová

Instalace průtokoměru

- nominální průměr potrubí
- obousměrné nebo jednosměrné proudění
- vibrace potrubí
- místo a typ nejbližšího ventilu
- místo a typ nejbližší armatury
- filtrace nutná
- uklidňující potrubí nutné
- přívod elektrické energie
- přístupnost pro obsluhu
- boční potrubí a ventily
- pumpy nebo kompresory v okolí

Provozní vlastnosti

- požadovaná přesnost měření
- požadovaná opakovatelnost měření
- požadovaný rozsah
- přípustná tlaková ztráta
- doba odezvy
- druh výstupního signálu

Dalšími kritérii jsou například ekonomické aspekty.

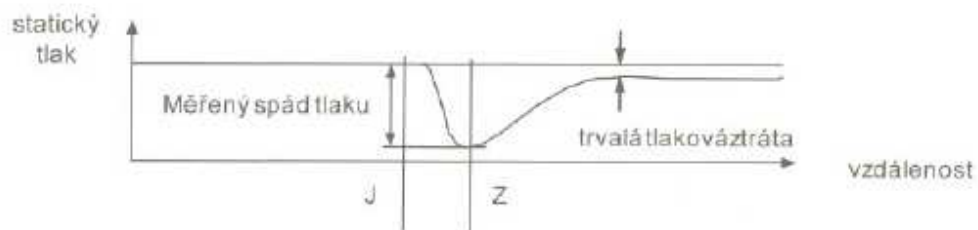
5 Principy rychlostních průtokoměrů

5.1 Průtokoměry pracující na principu tlakového rozdílu

Využívají princip zachování energie v proudící tekutině formulovaný Bernoulliho rovnicí (11). Při proudění tekutiny vzniká kinetická energie vyvolávající vzrůst dynamického a pokles statického tlaku, celkový (totální) tlak však zůstává zachován [10]. Informaci o rychlosti proudění lze získat z dynamického tlaku. Dynamický tlak může být určen jako rozdíl statických tlaků před a za překážkou (tzv. *primární* člen průtokoměru) zmenšující průřez potrubí nebo z rozdílu celkového tlaku a statického tlaku. K měření statického tlaku se používá senzoru tlaku (*sekundární* člen průtokoměru) s osou směrově charakteristiky kolmo na směr proudění, zatímco při měření celkového tlaku je tato osa rovnoběžná se směrem proudění.

5.2 Průtokoměry se škrťacími orgány

Určení průtoku z tlakové diference (ztráty) naměřené na místě zúžení průřezu potrubí (překážky, škrťacího orgánu, primárního článku) je založeno na Bernoulliho rovnici (11) a je doposud velmi často užívanou metodou měření průtoku v průmyslových aplikacích. Tekutina se při průtoku škrťacím orgánem zrychluje a energie pro toto zrychlení se získá poklesem statického tlaku v místě zúžení (obr.9). Minimum statického tlaku je v místě s maximální rychlostí proudění.

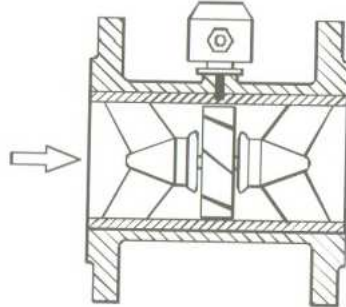


Obr. 9 Průběh tlaku, proudnic v závislosti na vzdálenosti od clony. Obvyklá poloha míst odběru tlaku: na přírubě J, v místě Z [6].

5.3 Turbinové průtokoměry

Protékající tekutina uvádí do rotačního pohybu lopatkový rotor s vhodně zakřivenými plochými lopatkami, umístěný v ose tělesa průtokoměru. Každému průchodu lopatky odpovídá jisté objemové množství a objemový průtok se určuje z počtu průchodů listu turbíny nebo lopatek pod senzorem polohy (obr. 10). Počet lopatek je volen podle aplikace a rozsahu, bývá v rozmezí 6 ÷ 20. Měřený objemový průtok odpovídá proleklému objemovému množství a není přímo závislý na hmotnosti tekutiny. To je důvod, proč z hlediska třídění, nejsou turbínové průtokoměry

zařazovány do skupiny pracující na základě kinetické energie proudící tekutiny. Výstupem turbínových průtokoměrů jsou impulsy, získané zesílením a tvarováním signálu ze senzoru průchodu lopatek.



Obr. 10 Turbinový průtokoměr v řezu dle [10].

Turbíny mohou v základním provedení pracovat v rozsahu teplot od -200 do $+200^{\circ}\text{C}$, tlaky až do 32 MPa , světlosti potrubí 5 až 70 mm , jmenovité průtoky $1,5\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ až $100\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

Kryogenní varianta je vhodná pro teploty od -273°C , vysokoteplotní provedení může pracovat při teplotě až 500°C .

Přetížitelnost průtokoměru se udává v procentech maximálního průtoku a typicky činí 150 až 200% . V běžných aplikacích se turbínový průtokoměr vybírá tak, aby pracovní průtok ležel okolo 50% maxima. Tím je zajištěna dostatečná rezerva pro případné přetížení současně s podstatným prodloužením životnosti ložisek.

Nevýhody

Hlavní nevýhodou turbínového principu je skutečnost, že průtok nelze měřit úplně od nuly. Minimální měřitelný průtok se udává v podobě relativního rozsahu měření jako poměr maximálního a minimálního průtoku. Základní hodnota rozsahu měření pro kapalinové průtokoměry je $10:1$, různými postupy lze však dosáhnout poměru až $200:1$.

U plynových průtokoměrů je určení rozsahu měření otázkou výpočtu, v němž hlavním ovlivňujícím faktorem je hustota plynu za pracovních podmínek. Typická hodnota se pohybuje mezi $5:1$ až $50:1$.

Opotřebení ložisek

Jedním z dalších problémů je opotřebení ložisek. Ložiska je třeba v pravidelných intervalech měnit. Interval výměny závisí na režimu provozu a druhu média, zpravidla se však pohybuje od osmnácti měsíců do pěti let. Měřená tekutina může do jisté míry působit také jako

mazivo ložisek a pokud je kompatibilní s materiálem ložisek (často karbidy wolframu, keramika) životnost ložisek se podstatně prodlužuje.

Výhledy dalšího vývoje

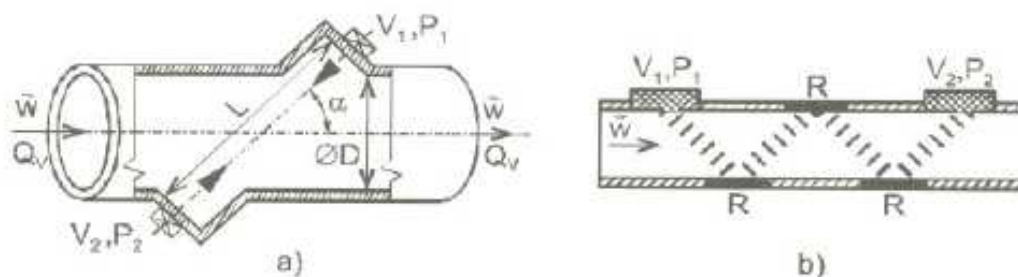
Měření průtoku turbinovým principem sice patří k nejstarším metodám (vynalezeny Reinhartem Woltmannem v 18. století) [3, 6], avšak díky uplatnění novinek z výzkumu v oblasti letecké a raketové techniky lze dosáhnout vysoké přesnosti i dlouhodobé provozní spolehlivosti. Turbiny nachází uplatnění zejména pro průběžná měření vyžadující nejistoty řádově desetiny procenta. Pro další zpracování je výhodné, že výstupní signály z turbiny mají diskrétní charakter. Právě potřeba zpracování impulzních signálů z turbinových průtokoměrů byla v začátcích rozvoje automatizační techniky stimulem rozvoje digitální měřicí a regulační techniky.

5.4 Fluidikové průtokoměry

Fluidiková čidla jsou proudové tekutinové členy založené na aerohydrodynamických principech. K jejich ovládání se využívá vzájemného působení proudu tekutiny, snímače a aerodynamických jevů. Ve větší míře se začínají používat až po roce 1960. Fluidikovým čidlem (snímačem, senzorem) označujeme tu část měřicího kanálu, která převádí měřenou neelektrickou veličinu na změnu parametru tekutiny. Těchto skutečností se výhodně využívá i při konstrukci fluidikových průtokoměrů. Fluidikové průtokoměry se vyznačují některými výhodnými vlastnostmi, vyplývajícími z charakteru tekutiny jako pracovního měřeného média. Jsou vhodné pro těžké pracovní podmínky (vysoké teploty, velká zrychlení, vibrace, silná elektromagnetická pole, ionizující záření, výbušná prostředí apod.) [10, 11]. Vyznačují se vysokou spolehlivostí, dlouhou dobou života a nižšími pořizovacími náklady. Jejich spolehlivá činnost souvisí se známými (definovanými) parametry měřené tekutiny.

5.5 Ultrazvukové průtokoměry

Jsou založeny na změně rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukového vlnění proudem tekutiny. Ultrazvukové vlnění se šíří mezi vysílačem a přijímačem, které jsou umístěny na stěnách potrubí, v němž se měřená tekutina pohybuje rychlostí \vec{v} . Proudění tekutiny vyvolá změnu rychlosti ultrazvukového vlnění úměrnou průměru vektoru rychlosti pohybu tekutiny v do vektoru rychlosti ultrazvukového vlnění \vec{c}_0 . Ultrazvukové vlnění je generováno (vysíláno) i přijímáno ultrazvukovým měničem, pracujícím střídavě v režimu *piezostrikčním* (vysílač) nebo *piezoelektrickým* (přijímač) [3, 10].



Obr. 11 Ultrazvukové senzory průtoku [8]: a) princip, V_1 , V_2 je označení pro vysílací a P_1 , P_2 přijímací funkci měniče, b) prodloužení dráhy šíření ultrazvukového vlnění reflektory R [3].

Podle charakteru vysílaného vlnění mohou být ultrazvukové průtokoměry provozovány jak v režimu *spojité* akustické vlny (stále se vysílá nosná vlna - Continuous Wave - CW) [3], nebo v *impulzním* režimu. Při práci v impulzním režimu je po krátký časový interval opakovaně vysíláno spojitě ultrazvukové vlnění s frekvencí obvykle odpovídající rezonančnímu kmitočtu měniče.

Ultrazvukové průtokoměry se podle uspořádání dělí do tří základních skupin:

A) přímé impulzní

Měří dobu průchodu ultrazvukového signálu od vysílače k přijímači. Ultrazvuková vlna má tvar impulsu o trvání až několik ms, frekvence vlnění závisí na rezonanční frekvenci měniče a je zpravidla v rozmezí 500 kHz až 1 MHz.

B) zpětnovazební

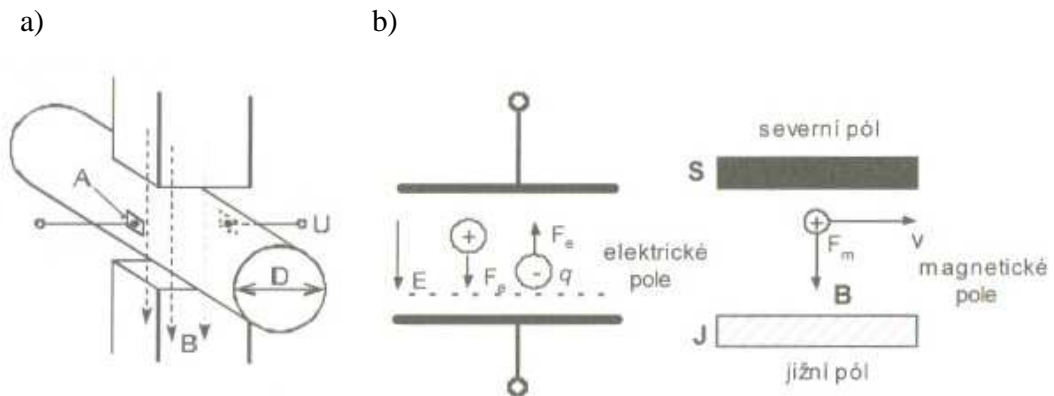
Výstupní signál z přijímače je po zesílení a úpravách fáze přiveden do měniče, pracujícího v režimu vysílače. Vzniká tak zpětnovazební zapojení tvořící oscilátor. Signál z přijímače může být spojitý, harmonický nebo ve tvaru impulsu harmonického signálu.

C) Dopplerovy

Vyhodnocují změnu kmitočtu vysílaného vlnění po jeho odrazu od částic unášených proudící tekutinou.

5.6 Elektromagnetické průtokoměry

Vznik napětí na elektrodách při pohybu vodivé tekutiny v magnetickém poli je základem činnosti moderní a perspektivní skupiny průtokoměrů podle norem označovaných jako indukční, jelikož se vznik napětí na elektrodách při proudění vysvětluje Faradayovým indukčním zákonem tj. vznik napětí je jako důsledek časové změny magnetického toku při pohybu myšleného vodiče - vodivé kapaliny v potrubí [7]. Ve skutečnosti vznik napětí je důsledkem Lorentzova zákona (24). Označení, lépe vyznačující fyzikální podstatu průtokoměrů je elektromagnetický průtokoměr. Navíc existuje průtokoměr pracující na duálním principu označovaný jako *magnetoelektrický*. Proto je správnější používat označení průtokoměr elektromagnetický místo indukční [6, 10]. Fyzikální podstatu průtokoměrů lépe vystihuje v cizí literatuře poměrně často užívaný název magnetický průtokoměr k označení indukčního.



Obr.12 a) Princip elektromagnetického průtokoměru. A - plocha elektrod, D -průměr potrubí (osa elektrod)

b) Elektrická F_e a magnetická F_m síla působící na elektrický náboj q v elektrickém a magnetickém poli - zákon Lorentzův [6].

Téměř všechna v literatuře uváděná odvození vzniku napětí U na elektrodách při pohybu náboje q rychlostí v v magnetickém poli o indukci B se opírají o Faradayův indukční zákon. Názornější (a k fyzikální podstatě bližší) je vysvětlení vzniku napětí na elektrodách jako důsledku působení Lorentzova zákona, určujícího magnetické síly působící na náboj q pohybující se v magnetickém poli o indukci B rychlostí \vec{v} a elektrické síly působící na náboj q v elektrickém poli o intenzitě E . Magnetickým polem vyvolaná síla \vec{F}_m vychylující náboj q pohybující se rychlostí \vec{v} je dána vektorovým součinem

$$\vec{F}_m = q(\vec{v} \times \vec{B}), \quad (22)$$

a její směr je určen podle pravidla pravé ruky. V znázornění podle obr. 12 b má podle tohoto pravidla síla směr od pozorovatele. Vychýlené náboje se usazují na elektrodách a vytvářejí rozdíl potenciálu - napětí U . Intenzita elektrického pole je za předpokladu homogenního pole dána napětím na elektrodách U a vzdáleností mezi nimi D [7, 9].

$$|\vec{E}| = \frac{U}{D} . \quad (23)$$

Potom elektrická složka Lorenzovy síly F_e je rovna

$$\vec{F}_e = q\vec{E} . \quad (24)$$

Rovnováha nastane při rovnosti obou sil, takže pro homogenní magnetické i elektrické pole s orientací podle obr.12b platí pro napětí mezi elektrodami známá závislost

$$U_i = \vec{v} \times \vec{B} \cdot \vec{D} . \quad (25)$$

Tato rovnice platí za předpokladu plynoucího z pravidel vektorového součinu tj. osa elektrod D je kolmá na rovinu, v níž leží navzájem kolmé vektory \vec{B} a \vec{v} . Podle Faradayova indukčního zákona napětí U_i na vodiči o délce D , pohybujícím se v magnetickém poli o indukcii B rychlostí v , je dáno také vztahem (25). Avšak fyzikální podstata vzniku napětí U v elektromagnetických průtokoměrech spíše odpovídá Hallovu jevu u polovodičů (kap.6) než Faradayovu zákonu [7, 9].

5.7 Tepelné průtokoměry

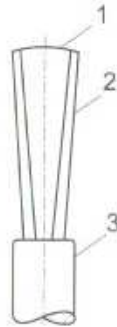
Tepelné průtokoměry [3, 4, 6] se dělí na termoanemometry a kalorimetrické. Jsou založeny na výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie (vyhříváním odporovým tělískem) a okolím (proudící tekutinou) v závislosti na hmotnostním průtoku. Jsou vhodné pro čisté plyny a kapaliny známého složení a vlastností, s malou hustotou a především pro malé průtoky plynu. K hlavním výhodám tepelných průtokoměrů, kromě možnosti přímého měření hmotnostního průtoku, patří rychlost a přesnost měření a stabilita parametrů.

K praktické realizaci (technickému využití) se používají dva základní způsoby:

- měření ochlazení vyhřívajícího tělíska, tj. vinutí, drátku nebo fólie (tzv. žárové anemometry nebo hmotnostní termoanemometry, někdy uváděné jako měřidla na principu teplotního rozptylu - disperze) a nebo naopak
- měření oteplení tekutiny vyhříváním prvkem (kalorimetrické, měření teplotního profilu nebo měřidla na principu teplotního nárůstu).

5.7.1 Termoanemometry

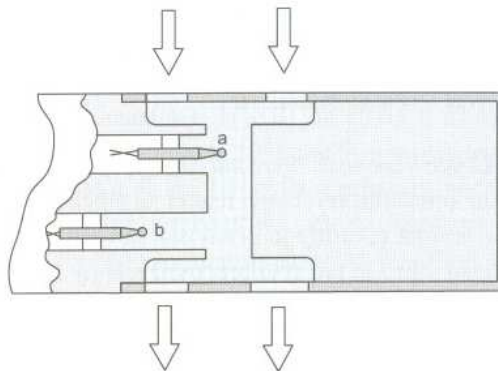
Mezi dvěma přívody 2 s minimální tepelnou vodivostí, umístěnými obvykle v keramickém (izolačním) držáku 3, je napjatý měrný odporový drátek 1, vyhříváný elektrickým proudem nad teplotu vnějšího obklopujícího prostředí (obr. 13).



Obr. 13. Princip odporového anemometru dle [4].

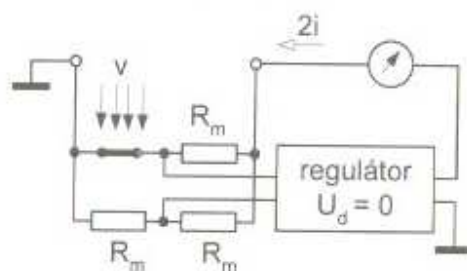
Průměr drátku se pohybuje v jednotkách až desítkách μm , délka jednotkách mm (poměr délka : průměru je > 100), materiálem je kov - např. Pt, Pt-Ir, W, Ni apod., nebo polovodič (mono- nebo polykrystalický) [4]. Vlastní odporový vyhříváný element 1 může být ve tvaru válce (drátek), fólie nebo polokoule. Konstrukce splňuje vždy základní podmínku činnosti, tj. vyloučení nebo aspoň minimalizaci všech teplotních ztrát mimo ztrát prouděním.

Na obr.14. je další varianta principiálního řešení odporového termoanemometru se dvěma snímači. Tekutina proudící shora dolů snižuje (ochlazuje) teplotu vyhříváného elementu **a** (odporového anemometru) a referenční snímač teploty **b** měří pouze teplotu tekutiny v daném místě (poloze). Standardní řešení představuje použití jednoho vyhříváného elementu. Místo kovových odporových senzorů teploty je možné použít dvou termistorů - v referenčním a snímacím módu. Výhodou je zvýšení citlivosti, může však dojít ke zvýšení nelinearity a změny citlivosti s teplotou.



Obr. 14 a) vyhřívací odporový element, b) (referenční) snímač teploty dle [3].

Na obr.15 je uvedena varianta s jedním snímačem v režimu konstantní teploty vyhřívaného drátku [3]. Elektronika senzoru udržuje teplotu vyhřívaného rychlostního čidla na stále stejné teplotě, která je vyšší jak teplota měřeného proudícího prostředí (v celém rozsahu měření). Elektrická energie (proud), která je k tomu zapotřebí, je přímo úměrná hmotnostnímu průtoku. Konstrukce senzoru se vyznačuje rychlou odezvou (malou časovou konstantou) a dostatečnou citlivostí i při velmi malých průtocích.



Obr. 15 Měřicí obvod termoanemometru dle [3].

5.7.2 Kalorimetrické průtokoměry

Hmotnostní průtok q_m je dán vztahem (26), který vyjadřuje explicitně jejich princip za stavu tepelné rovnováhy, tj. při rovnosti mezi přiváděnou tepelnou energií z vyhřívaného elementu (přívodem tepla) na straně jedné a tepelnými ztrátami prouděním tekutiny, vedením v tělese, konstrukcí, materiálu průtokoměru a přestupem do vnějšího prostředí (odvod tepla) na straně druhé.

$$q_m = A \frac{c_p (T_2 - T_1)}{P_E}, \quad (26)$$

kde A je konstanta [$J^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-2}$]

c_p je měrná tepelná kapacita tekutiny [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]

T_1 je teplota před topným elementem

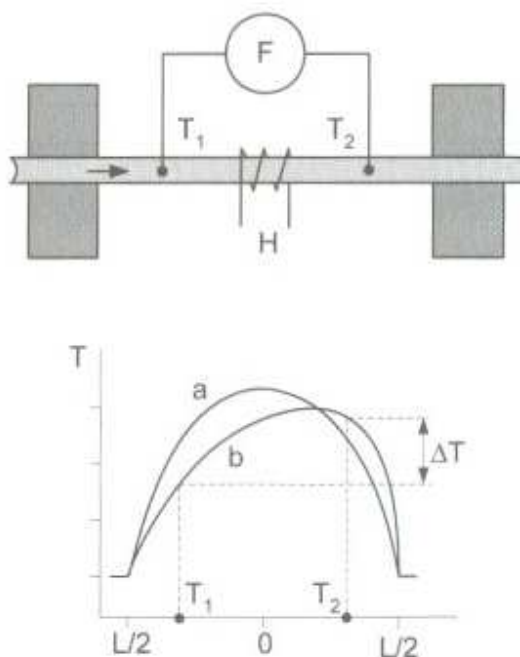
T_2 je teplota za topným elementem

P_E je příkon tepelného zdroje [$l \cdot s^{-1}$].

Konstanta A závisí jak na konstrukci hmotnostního průtokoměru (tepelné vodivosti použitých materiálů, koeficientu přestupu tepla atd.), tak i na vlastnostech měřeného média.

Zdroj tepelné energie H (obr. 16.) je symetricky umístěný na nebo v potrubí mezi snímači teploty, tzn., že se ve stejné vzdálenosti od něj měří rozdíl teploty před - T_1 , a za ním - T_2 . Rozdíl teplot ΔT se vyhodnocuje elektronikou v průtokoměru F [3, 6].

V horní části obrázku 16 je principiální prostorové uspořádání, v dolní rozložení teplot podél potrubí vůči počátku, tvořeného osou symetrie (středem) vyhřívacího elementu. Symetrický průběh teploty (a) odpovídá stavu, kdy průtokoměrem nic neprotéká (nulový průtok), křivka (b) průtoku v naznačeném směru proudění (zleva doprava). Při opačném směru proudící tekutiny je rozložení teploty oproti případu (b) zrcadlové vůči svislé ose procházející počátkem (0).



Obr. 16 Princip kalorimetrického hmotnostního průtokoměru
H – vyhřívaný element, $L/2$ - polovina délky trubice, F - průtokoměr
a T_1, T_2 -teplotní senzory dle [6].

5.8 Značkové průtokoměry

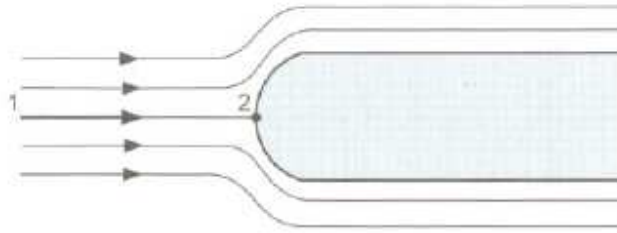
Patří mezi rychlostní průtokoměry a v nejjednodušším provedení (značka = předmět unášený tekutinou) byly k měření průtoku vodních toků používány již starověkými civilizacemi [1, 2]. V novém provedení se jako značky používá vhodné látky přimíšené do proudící tekutiny. Různé fáze proudící látky mohou být značkovány různými látkami, takže lze měřit průtok vícefázových směsí [5].

Průtokoměry se značením proudící tekutiny užívané v praxi jsou založeny na

- době postupu značky (impulzní a korelační metody)
- zřed'ování značkovací látky

5.9 Pitotova trubice

Při nárazu proudící tekutiny na tupé těleso, proudnice mají tvar obdobný jako na obr. 17.



Obr. 17 Rozložení proudnic kolem překážky s tupým čelem dle [5].

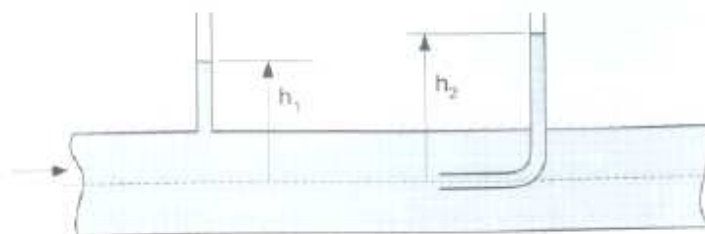
Na rozdíl od proudnic obtékajících překážku zleva i zprava, střední proudnice se zastaví na vrcholu překážky (bod 2). Zde je rychlost proudění nulová, tekutina neproudí a místo se označuje jako **bod stagnace** [5]. Tlak v bodě stagnace lze vypočítat z Bernoulliho rovnice (11) aplikované podél střední proudnice z bodu 1, v němž je tlak p_1 a rychlost v_1 , do bodu stagnace 2 s tlakem p_2 a rychlostí $v_2=0$. Oba body jsou v horizontální rovině, proto $h_2 = h_1$.

Na základě Bernoulliho rovnice platí pro $v_2=0$

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2. \quad (27)$$

Tlak v bodě stagnace p_1 se vůči p_2 zvýšil o hodnotu dynamického tlaku na celkový tlak (totální, stagnační). Překážka v proudu tekutiny nemusí být pevné těleso, může jít také o statický sloupec tekutiny. K určení rychlosti proudění v je tedy nutné znát hodnotu totálního tlaku p_2 a statického tlaku p_1 . Statický tlak měříme kolmo na směr proudění, totální tlak ve směru proudění [5]. Pokud v principiálním uspořádání podle obr. 18 je tlak měřen kapalinovými manometry, pak výška sloupce tlakoměrné kapaliny h_1 odpovídá statickému a výška h_2 totálnímu tlaku. Pro rychlost pak platí

$$\bar{v} = \sqrt{2g(h_2 - h_1)}. \quad (28)$$

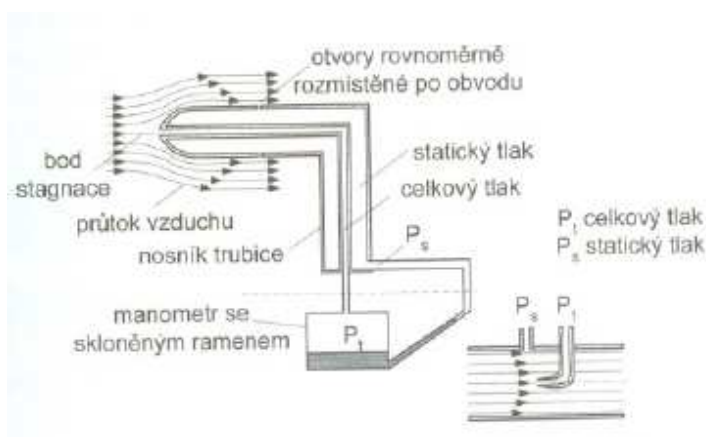


Obr. 18 Princip Pitotovy trubice dle [5].

5.10 Prandtlova trubice

Jde o zvláštní uspořádání Pitotovy trubice upravené tak, aby se celkový a statický tlak měřil přibližně ve stejném místě proudící tekutiny (tvar písmene L). Místa pro odběr statického tlaku (štěrbiny) jsou ve vzdálenosti větší než $3d$ (d je průměr válcové sondy) [5]. Ideální tvar sondy je rotační paraboloid, je však výrobně obtížný a proto se používá válcovitého tvaru.

V uspořádání na obr. 19. je statický tlak přiváděn do diferenčního senzoru tlaku bočním otvorem orientovaným kolmo na směr proudění. Je vhodné, aby na místě měření statického tlaku byly turbulence minimální. Totální tlak je měřen v místě náporu (stagnace) otvorem s osou rovnoběžnou se směrem proudění.



Obr. 19. Prandtlova trubice tvaru L připojená k diferenčnímu manometru měřícímu rozdíl celkového tlaku P_t a statického tlaku P_s [5].

6 Volba principu pro realizaci

K realizaci měřiče rychlosti proudu byl zvolen princip turbinového průtokoměru. Tento princip je realizován z vhodné turbíny. Jak se ukázalo po praktických zkouškách, jako nejvhodnější pro dané použití byla zvolena vrtulka, která byla demontována z chladicího dmyhadla počítačového zdroje. Do této vrtule byly vsazeny čtyři magnety z použité počítačové klávesnice. Tyto magnety umožňují bezkontaktní snímání otáček vrtule – turbíny. Jako bezkontaktní snímač byl použit detektor pracující na principu Hallova jevu. Hallův jev je proces generace elektrického pole v polovodiči (existuje i v kovech, ale vzhledem k vysoké koncentraci vodivostních elektronů se téměř neuplatňuje) za současného působení vnějšího elektrického i magnetického pole. Důsledkem toho se hromadí na jedné straně látky záporný náboj a na straně druhé náboj kladný. Díky tomu, že póly mají různý potenciál, vzniká Hallovo napětí [8].

Tento snímač proto při průchodu magnetu v jeho blízkosti generuje napěťový impuls. Vrtulka – turbínka je namontována na plastové desce ve které je upevněno čidlo, zalitím do lepidla (obr. 25). Celá tato mechanická část je nasazena na tyči kruhového průřezu z nerezavějící oceli (obr. 26). Tato tyč slouží současně jako držák systému měřicí vrtulky – turbíny a zároveň jako stojan, který umožňuje umístit měřicí systém do proudu kapaliny (vody) a zároveň nastavit požadovanou hloubku, ve které má být měření prováděno (obr. 27).

Princip turbinového průtokoměru byl zvolen pro podmínky ve kterých má tento průtokoměr pracovat, jedná se hlavně o měření rychlosti proudu v potocích či řekách a právě turbínka se jevila jako nejvhodnější řešení, jelikož může pracovat i v kalném prostředí, při nízkých teplotách a není náročná na údržbu. Taktéž technické řešení tohoto typu měřiče rychlosti proudu se jevilo z hlediska technologických možností jako nejsnáze realizovatelné.

Tímto průtokoměrem je možno měřit rychlost proudu vody v hloubce od 10 cm až do 100 cm, nebo je možno měřit rychlost například jedoucí loďky.

7 Konstrukce turbinového měřiče rychlosti proudu

7.1 Princip funkce měřiče rychlosti proudu

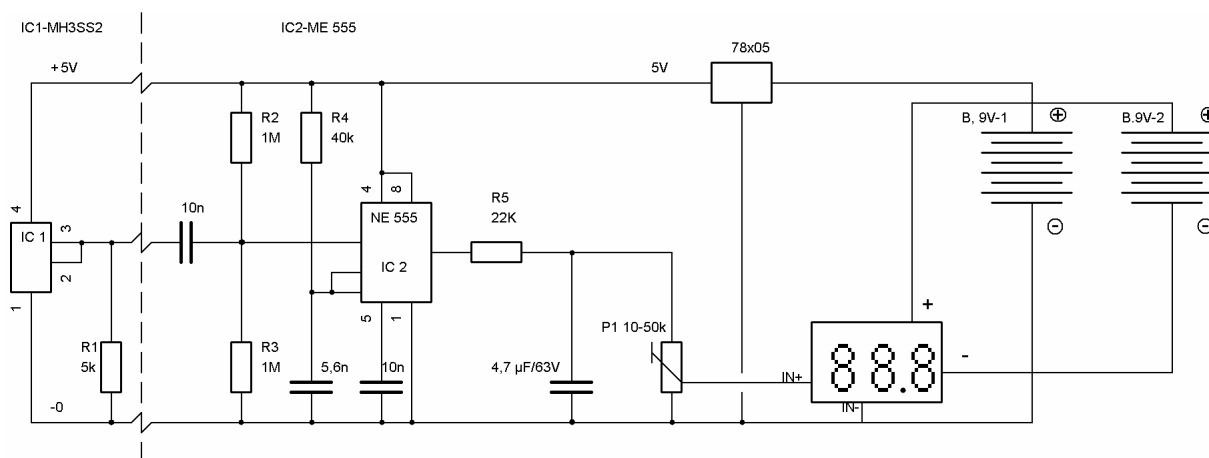
Mechanickým principem vyvinutého měřiče rychlosti je snímání rychlosti proudu tzv. turbínkou, jejíž otáčky jsou přímo úměrné rychlosti proudu [3, 6]. Tyto otáčky jsou pak na turbince osazené magnety snímány bezkontaktním snímačem MH3SS2, pracujícím na principu Hallova jevu. Tento snímač generuje napěťové impulsy. Tyto impulzy jsou pak na monostabilním klopném obvodu s časovačem NE 555 tvarovány na impulzy konstantní šířky a amplitudy. Dále jsou pak na integračním článku vyhlazeny a vzniklé stejnosměrné napětí je

svou velikostí přímo úměrné rychlosti otáčení turbíny, respektive rychlosti proudu kapaliny, ve které je turbinka umístěna. Zapojení obvodu NE 555 a integračního článku pracuje jako převodník kmitočtů – napětí. Toto napětí je pak přivedeno na modul panelového měřidla HD-3428, které měří napětí na integračním článku. Systém je pak ocejchován tak, že např. rychlost proudu v $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ odpovídá napětí v mV.

Signál z Hallova detektoru MH3SS2 je též vyveden na sériový port COM 1, a je tak umožněno připojit měřicí systém k počítači řady PC. Za použití vyvinutého programu, je pak možno měřit rychlost proudu počítačem v reálném čase (obr. 28).

7.2 Schéma zapojení

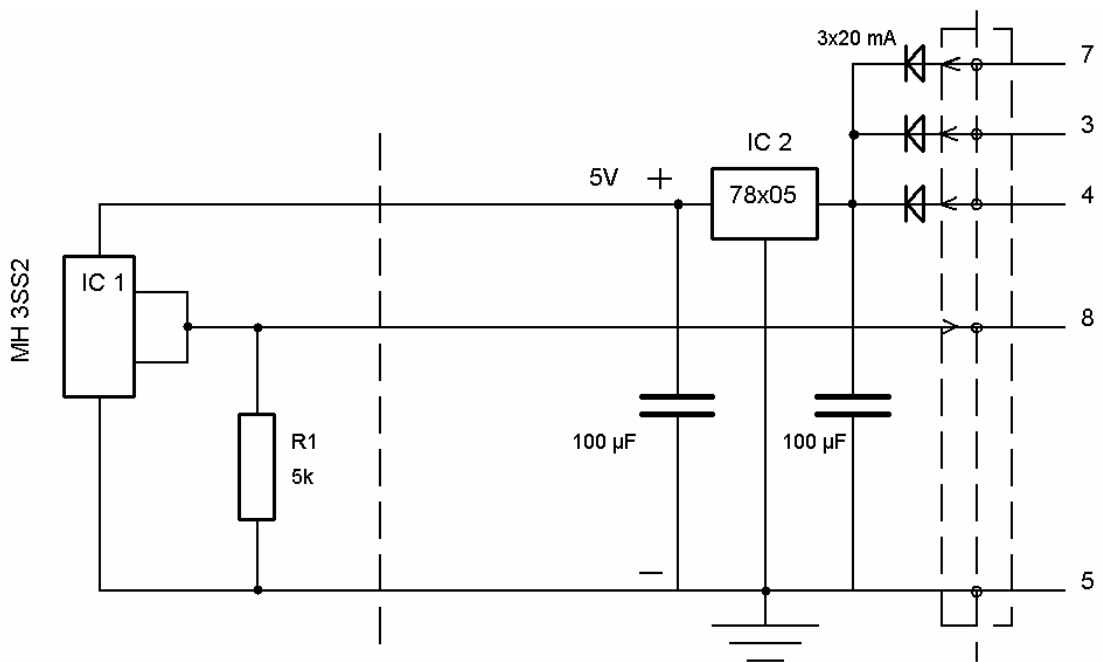
Na obr. 20 je uvedeno schéma zapojení elektronické části měřiče rychlosti proudu. Čárkovaně je vlevo oddělena Hallova sonda MH3SS2, jejíž výstup je přiveden jednak na tvarovač, převodník kmitočtů - napětí s obvodem NE 555 a taktéž k sériovému portu osobního počítače. Celý tento obvod je napájen ze dvou devítivoltových baterií.



Obr. 20 Schéma zapojení elektronické části.

7.3 Popis způsobu připojení systému k počítači

Datové linky 4,3,7 napájí stabilizátor 7805 na 5V přímo ze sériového portu počítače, každý dává 20mA, to je dostatečné k pokrytí vlastního odběru IO 7805 a ostatních obvodů zařízení. Diody bezpečně oddělují kladné napětí. Čidlo je tvořeno obvodem MH3SS2. Logika se načítá linkou 8 do com1 PC.

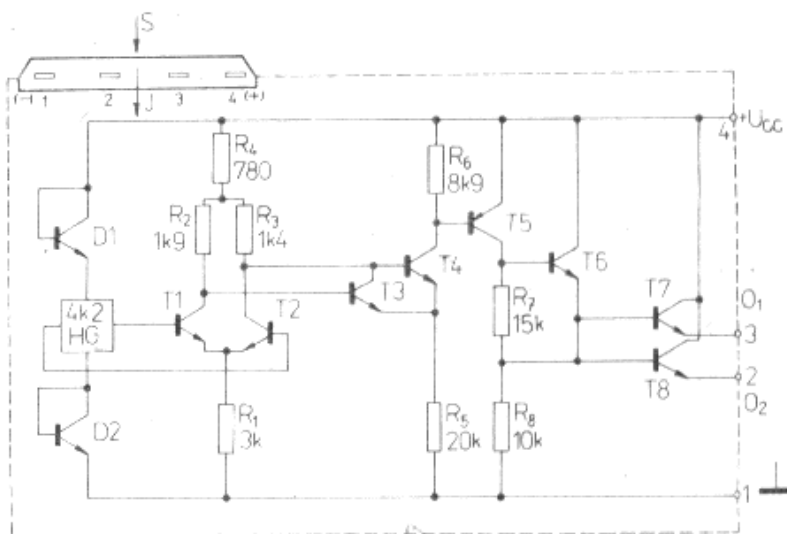


Obr. 21 Schéma připojení k sériovému portu PC.

7.4 Detailní popis použitých elektronických komponent

7.4.1 Čidlo

Je tvořeno obvodem MH3SS2 (detektor magnetického pole), který převádí magnetickou energii a její změnu na signál TTL, jde o 5-ti voltovou logiku.



Obr. 22 Schéma obvodu MH3SS2.

7.4.2 Rezistor R1

Převede výstupní proud na napětí.

7.4.3 Kondenzátor 10n

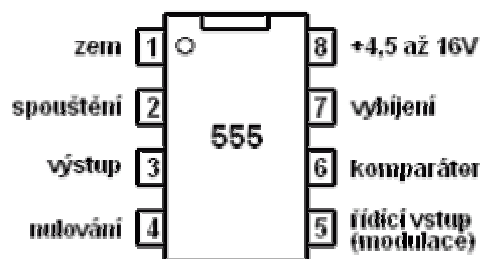
Odděluje stejnosměrnou složku, projde pouze změna impulsu.

7.4.4 Rezistory R2 a R3

Tvoří dělič napětí pro lepší rozhodovací funkci NE555.

7.4.5 Časovač NE555

Tvoří časovač, který vždy k jednomu impulsu přiřadí stejně dlouhý impuls. Ten je pak přiveden na kondenzátor 4,7 mikrofaradu. Spolu s potenciometrem 10k tvoří samotný zdroj měřeného napětí voltmetrem.



Obr. 23 Časovač NE 555.

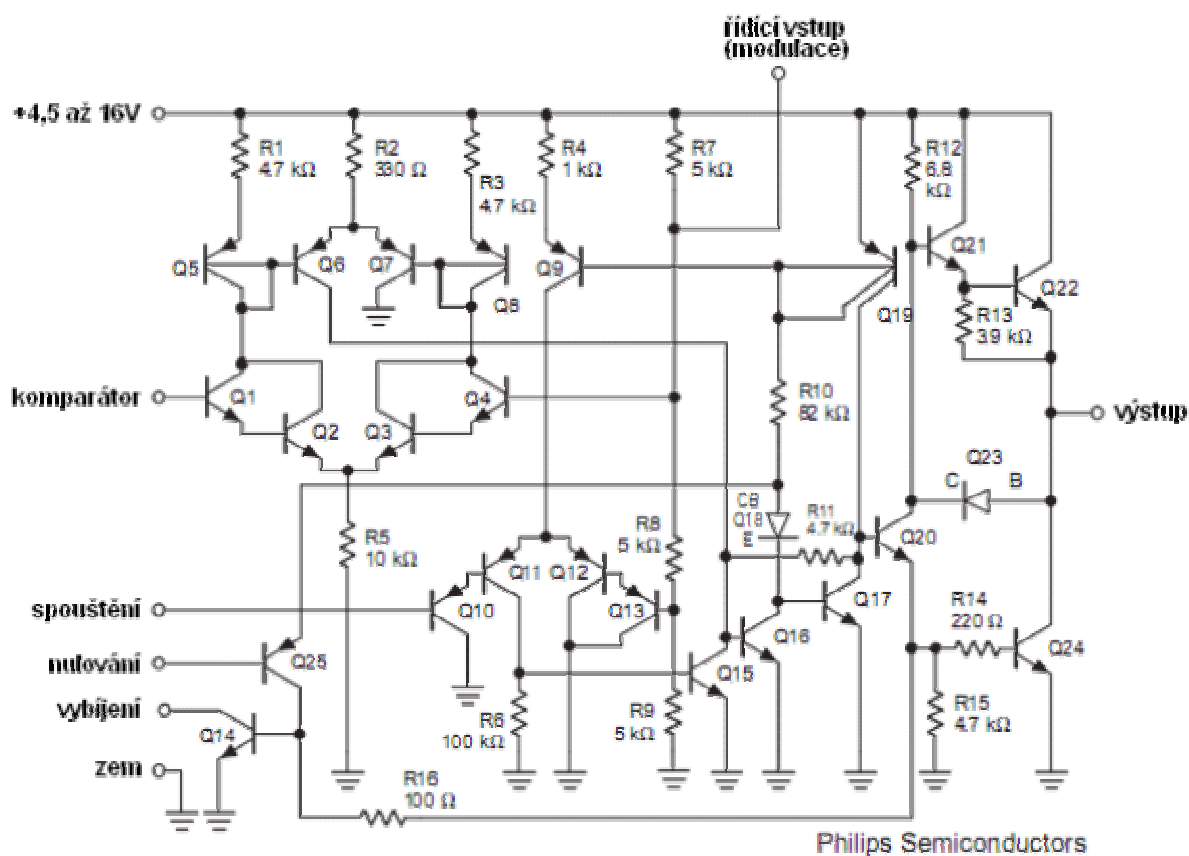
Vlastnosti:

- Spínací doba menší než 2 ms
- Maximální pracovní frekvence větší než 500 kHz
- Délka jednoho impulsu od ms po hodiny
- Pracuje jako astabilní i jako monostabilní multivibrátor
- Velký výstupní proud
- Nastavitelná střída (poměr impulsu k mezeře)
- Kompatibilita s TTL
- Teplotní stabilita 0,005% na 1°C

Integrovaný obvod NE555 (SE555, ICM7555...) je monolitický časovač, který se používá jako zpožďovací člen (monostabilní multivibrátor) nebo jako oscilátor (astabilní multivibrátor).

Ve funkci zpoždovacího členu vystačí časovač jen se dvěma vnějšími součástkami – jedním kondenzátorem a jedním rezistorem. Frekvence a střída oscilátoru se nastavuje dvěma vnějšími rezistory a jedním externím kondenzátorem. Spouštění a nulování se provádí sestupnou hranou impulzů na dvou nezávislých pinech. Z výstupu dodávaný proud I_{SOURCE} a do výstupu tekoucí proud I_{SINK} mohou oba dosahovat hodnoty až 200 mA. Obvod je navíc kompatibilní s obvodů TTL.

Integrovaný obvod NE555 je určen pro rozsah pracovních teplot $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, zatímco SE555 je vhodný pro teplotní rozsah dokonce $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 24 Schéma NE 555.

7.4.6 Panelové měřidlo HD-3428

Je 3 ½ místný LCD panel metr s nastavitelnou desetinnou tečkou a automatickou indikací polariry.

Vlastnosti:

- Maximální vstupní napětí: 199,9 mV DC
- Výška znaku: 13 mm
- Rozměr: 68x44 mm
- Napájení: 6-9 VDC/1mA
- Vstupní impedance: >100 MΩ
- Přesnost: ±0,5% (23°±5°C, <80% RH)
- Desetinná tečka nastavitelná zkratovací propojkou (jumper)
- Přední rámeček je možné oddělit od panelu
- Indikace napětí "1"

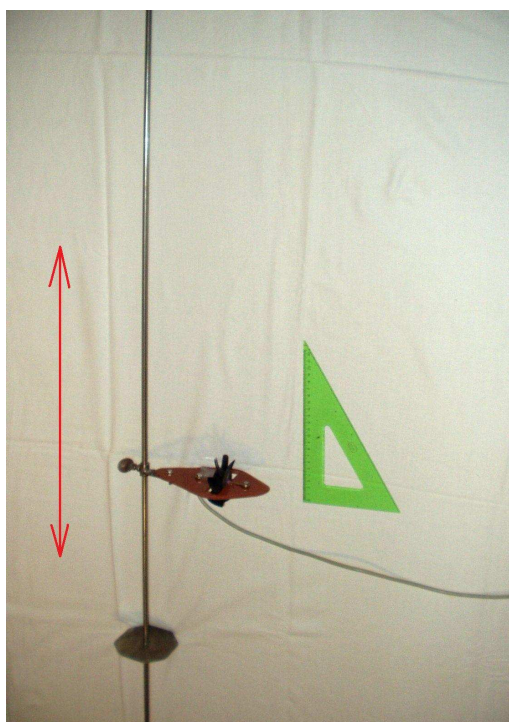
8 Fotodokumentace



Obr. 25 Sonda.



Obr. 26 Stojan.



Obr. 27 Sestavený systém, kde šipky ukazují možnost nastavení hloubky měření.



Obr. 28 Zobrazení na monitoru počítače.

9 Závěr

Na základě stanovených cílů práce byl sestaven přehled fyzikálních principů průtokoměrů, resp. principů měření rychlosti proudu média. Větší pozornost a širší zpracování bylo věnováno turbinovým průtokoměrům. Širší zpracování tematiky těchto průtokoměrů bylo uvedeno, protože pro konkrétní realizaci měřiče rychlosti proudu byl zvolen právě tento princip, při kterém jsou otáčky turbíny osazené magnety snímány bezkontaktním snímačem, který generuje napěťové impulzy, které jsou pak tvarovány na impulzy konstantní šířky a amplitudy.

Tyto impulzy jsou pak na integračním článku vyhlazeny a vzniklé stejnosměrné napětí je svou velikostí přímo úměrné rychlosti otáčení turbíny. Toto napětí je pak přivedeno k panelovému měřidlu. Údaj měřidla je úměrný velikosti rychlosti proudu. Sondu je též možno připojit k sériovému portu osobního počítače a pomocí vyvinutého programu měřit a zobrazovat údaj o rychlosti na monitoru. Tento zkonstruovaný systém umožňuje tedy měřit rychlost proudu od zlomků cm/s po cca. 2 m/s v otevřených tocích potoků či řek a to v různých hloubkách ode dna toku do hloubky až 1 m, na různých místech dosažitelných obsluhou a to i v kalném a znečištěném prostředí. Po změření průřezu koryta, za předpokladu homogenity rychlosti proudění, je možné přímo měřit průtok-jednak okamžitou hodnotu i celkové množství, ať už objem, nebo hmotnost protečené vody. Systém je možno dále rozšířit vhodnou úpravou měřicího programu na kontinuální záznam dat v reálném čase.

10 Seznam literatury

- [1] ZAMAROVSKÝ, V. Jejich veličenstva pyramidy. Praha: Alfa, 1981.
- [2] ZAMAROVSKÝ, V. Na počátku byl Sumer. Praha: Perfekt, 2004.
- [3] ĎAĎO, S., BEJČEK, L., PLATIL, A. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: Ben, 2005.
- [4] KŘÍŽ, V., KUPČO, M., SOCHOREC, R. Měření průtoků. Praha: SNTL, 1979.
- [5] MATTAS, D. Měření průtoků nestandardními metodami a v nestandardních podmínkách. Praha: Výzkumný ústav vodohospodářský T.G. Masaryka, 1998.
- [6] STRNAD, R. Trendy měření průtoku. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2004.
- [7] MIKYŠKOVÁ, M. Měření průtoku škrťacími orgány. Díl 1, Obecná část. Praha: Dům techniky, 1990.
- [8] ŠVEC, J. Hydraulické ztráty a měření průtoku časově nezávislých nenevtonovských kapalin. Praha: Academia, 1978 (PG 6).
- [9] MIKYŠKOVÁ, M. Měření průtoku škrťacími orgány. Díl 2, Specifické aplikace. Praha: Dům techniky, 1990.
- [10] PATOČKA, C. Měření průtoku zúžením vodního proudu. Praha: Vědecko-technické nakladatelství, 1950.
- [11] PATOČKA, C. Novější způsoby měření průtoků v otevřených tocích. Praha: Technické knihkupectví a nakladatelství, 1948.

11 Příloha

Program (napsán v jazyce Turbo Basic).

```
10 tt=0
20 gosub 5000
30 screen 12
40 ba=&h3f8
50 gosub 1300
60 out (ba+4),1:out (ba+4),2:out (ba+3),64
70 gosub 4000
80 et$=time$
90 a$=inkey$
100 if a$="e" then gosub 1000
110 if et$=time$ then goto 140
120 et$=time$:sx1=pocet:pocet=0:rt=0:gosub 1300:gosub 1800
125 locate 16,39:print "    "
130 locate 16,39:color 15:print ex/2:ex=0
140 rem
200 y=inp (ba+6) and 16
210 if y=16 then g=1
215 if y=0 then g=0
220 if g=u then goto 240
230 rt=rt+0.1:ex=ex+1:pocet=6.2-rt
240 u=g
600 goto 90
1000 out (ba+4),0:out (ba+3),0:end
1290 rem _____ obrazovka _____
1300 circle (320,240),50,8
1310 circle (320,240),51,7
1315 circle (320,240),200,8
1318 circle (320,240),202,7
1350 rem paint (320,240),8,7
1355 COLOR ,,2:locate 14,37:print "RYCHLOST"
1357 LOCATE 15,38:PRINT "CM/S"
1358 color ,,14:LOCATE 5,39:PRINT "15.5":COLOR ,,14:LOCATE 18,18:PRINT "6"
```

```

1359 COLOR ,,14:LOCATE 18,61:PRINT "25"
1360 FOR X=0.14 TO 6.14 STEP 0.05
1361 LINE ((SIN(X)*154)+320,(COS(X)*154)+240)-
      ((SIN(X)*158)+320,(COS(X)*158)+240),14
1362 NEXT X
1370 PSET (60,20):DRAW "C7;R510;F20;D400;G20;L510;H20;U400;E20"
1371 PAINT (62,22),8,7
1380 PSET (80,40):DRAW "C0;F5;E5;F2;G5;F5;G2;H5;G5;H2;E5;H5;E2"
1385 CIRCLE (85,47),11,0
1390 PSET (535,45):DRAW "C0;F5;E5;F2;G5;F5;G2;H5;G5;H2;E5;H5;E2"
1395 CIRCLE (540,52),11,0
1400 PSET (535,410):DRAW "C0;F5;E5;F2;G5;F5;G2;H5;G5;H2;E5;H5;E2"
1405 CIRCLE (540,417),11,0
1410 PSET (80,410):DRAW "C0;F5;E5;F2;G5;F5;G2;H5;G5;H2;E5;H5;E2"
1415 CIRCLE (85,417),11,0
1500 return
1800 rem _____ rucicka ukazatele _____
1805 rem
1810 LINE ((SIN(S1-0.2)*74)+320,(COS(S1-0.2)*74)+240)-
      ((SIN(S1+0.2)*74)+320,(COS(S1+0.2)*74)+240),0
1815 LINE ((SIN(S1-0.2)*74)+320,(COS(S1-0.2)*74)+240)-
      ((SIN(S1)*150)+320,(COS(S1)*150)+240),0
1820 LINE ((SIN(S1+0.2)*74)+320,(COS(S1+0.2)*74)+240)-
      ((SIN(S1)*150)+320,(COS(S1)*150)+240),0
1825 LINE ((SIN(Sx1-0.2)*74)+320,(COS(Sx1-0.2)*74)+240)-
      ((SIN(Sx1+0.2)*74)+320,(COS(Sx1+0.2)*74)+240),15
1830 LINE ((SIN(Sx1-0.2)*74)+320,(COS(Sx1-0.2)*74)+240)-
      ((SIN(Sx1)*150)+320,(COS(Sx1)*150)+240),15
1850 LINE((SIN(Sx1+0.2)*74)+320,(COS(Sx1+0.2)*74)+240)-
      ((SIN(Sx1)*150)+320,(COS(Sx1)*150)+240),15
1860 rem
1890 s1=sx1
1900 RETURN
4000 rem _____ cekaci smycka 1 s _____

```

```
4010 for t=1 to tt step 1
4020 next t
4100 return
5000 rem _____ Mereni rychlosti PC _____
5010 a$=time$:ttt=0
5020 rem
5030 if a$=time$ then goto 5020
5040 a$=time$
5050 ttt=ttt+1
5060 if a$=time$ then goto 5050
5070 tt=ttt/100
5100 return
```