

Laboratoř měření průtoku

The flow measurement laboratory

Aleš Kocián

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval/a samostatně a použitou literaturu jsem citoval/a.

Ve Zlíně, 07. 06. 2005

.....

jméno diplomanta

Abstrakt

Tato práce se zabývá způsoby měření průtoku kapalin ve světě. Jsou zde popisovány metody měření průtoku kapalin, které se obecně používají ve světě - jak rychlostní, tak objemové a rozpracován princip (funkčnost) jednotlivých průtokoměrů. Dále jsou zde uvedeny konkrétní příklady použití v průmyslových aplikacích hlavně od firmy Siemens, Krohne, Endres Hauser. V této práci je kladen důraz na optimální výběr průtokoměrů pro měření v laboratorních podmínkách, návrh a projekt úlohy pro měření průtoku kapalin v laboratorních podmínkách, změnou rychlostí a tlaků v těchto průtokoměrech.

Abstract

This thesis deals with the ways of measuring the flow of liquids in the world. Both methods of measurement liquids flow considering speed and capacity are described here as well as principle and functioning of separate flow-measures. Furthermore there are stated concrete examples of a factory use mainly in companies such are Siemens, Krohne, Endres Hauser. My main intention was to focus on optima choice of flow-measurers when measuring in laboratory conditions, proposal and project of such a task and the change of speed and preasure in these flow-measurers.

OBSAH

ÚVOD	6
1 PRINCIPY MĚŘENÍ PRŮTOKU A MNOŽSTVÍ TEKUTIN	7
1.1 OBECNÉ POJMY	7
1.2 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ	8
1.2.1 Objemová metoda měření průtoku	8
1.2.2 Rychlostní metoda měření průtoku	9
2 SNÍMAČE PRŮTOKU A PRŮTOKOMĚRY	10
2.1 POŽADAVKY NA SNÍMAČE PRŮTOKU A PRŮTOKOMĚRY	10
2.2 OBJEMOVÉ SNÍMAČE	11
2.2.1 Bubnové snímače	11
2.3 RYCHLOSTNÍ SNÍMAČE	12
2.3.1 Plováčkové snímače	13
2.3.2 Lopatkové a šroubové (turbínové) snímače	14
2.3.3 Průřezové snímače	16
2.3.4 Indukční snímače	19
2.3.5 Ultrazvukové snímače	21
2.3.6 Vírové průtokoměry	23
2.3.7 Coriolisovy průtokoměry	23
3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKŮ	25
3.1 PODLE DRUHU MĚŘENÉ TEKUTINY	25
3.2 PODLE ROZSAHU TEPLoty MÉDIA, ROZSAHU A NEJISTOTY MĚŘENÍ	26
3.3 NEJISTOTA MĚŘENÍ	27
3.3.1 Kalibrace	27
3.3.2 Chyba přístroje	27
3.3.3 Nejistoty měření	27
4 VÝBĚR PRŮTOKOMĚRŮ PRO LABORATORNÍ A VÝUKOVÉ ÚČELY	30
4.1 POTRUBÍ	30
4.2 REGULAČNÍ DVOUCESTNÝ VENTIL SE SPOJITÝM OVLÁDÁNÍM - TYP - H42031	
4.3 ČERPADLO	33
4.4 INDUKČNÍ PRŮTOKOMĚR - SITRANS FM 711	34
4.5 CORIOLISŮV PRŮTOKOMĚR - SITRANS FC MASSFLO MASS 2100	35
4.6 PLOVÁČKOVÝ PRŮTOKOMĚR - ROTAMETR SITRANS FVA	36
4.7 ŠKRTÍCÍ CLONY - SITRANS P DS	37
4.8 DIFERENCE TLAKU - SITRANS P DS 3 PA	38
5 NÁVRH A PROJEKT ÚLOHY PRO ZAŘÍZENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY	39
5.1 VÝPOČTY K NÁVRHU ÚLOHY	39
5.1.1 Předpoklad	39
5.1.2 Úbytky tlaku	41
5.2 SCHÉMA VSTUPŮ A VÝSTUPŮ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ SESTAVY	43
ZÁVĚR	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	46
SEZNAM OBRÁZKŮ	47
SEZNAM TABULEK	48

ÚVOD

Účelem této diplomové práce je podání základních informací o současně využívaných metodách měření průtoku kapalin, literární rešerše o měření průtoku se zřetelem na měření průtoku kapalin v laboratořích. Je navrženo měřicí zařízení pro výuku a měření průtoku kapalin v laboratoři.

Návrh měřicího zařízení vychází z poznatků publikovaných v odborné literatuře. Zařízení je konstruováno pro měření průtoku kapalin a to čtyřmi různými druhy průtokoměrů.

První kapitola je věnována principům měření průtoku a množství tekutin. Měření průtoku a proteklého množství tekutin patří do oblasti velmi důležitých měření, kterých se značně využívá v průmyslu. Jsou zde nastíněny obecné pojmy týkající se měření průtoku, definice a dvě základní rozdělení-objemová a rychlostní metoda měření průtoku.

Druhá kapitola se zabývá čidly pro měření průtoku, jejich popisem, rozбором a schématickými obrázky pro pochopení funkčnosti některých druhů čidel. Zvlášť jsem se zaměřil na čidla, která budou použita v tomto modelu, u kterých jsem provedl důkladnější rozbor s odkazy na firmy, které je vyrábějí. Jsou to čidla indukční, rotametry, clonové a Coriolisova.

Další kapitola je věnována možnostem měření podle druhu měřené kapaliny, rozsahu teploty média, rozsahu a nejistot měření. Při výběru průtokoměru musíme zvážit jaký druh tekutiny budeme měřit a z toho vycházet při výběru čidel průtokoměru. Jsou zde příklady průtokoměrů aplikovaných v průmyslu od firmy Krohne a na konci této kapitoly je obecná zmínka o nejistotách měření a kalibraci.

Poslední dvě kapitoly se zabývají výběrem průtokoměrů pro laboratorní a výukové účely. Výběr byl redukován na firmu Siemens, která spolupracuje s naší školou. Dále se zabývají výběrem potrubí, čerpadla, čidly pro měření difference tlaku, regulačními spojitými ventily a sestavením schématu modelu.

Následuje závěr a seznam použité literatury.

1 PRINCIPY MĚŘENÍ PRŮTOKU A MNOŽSTVÍ TEKUTIN

Měření průtoku a proteklého množství tekutin patří do oblasti velmi důležitých (především bilančních) měření. Při vlastním návrhu snímače a jeho konstrukčním řešení, výběru a instalaci se obvykle vyskytne mnoho problémů, ať již z hlediska druhu (kapalina, pára, plyn) a vlastností (např. tlak, teplota, hustota, viskozita, znečištění pevnými látkami, elektrická vodivost, výbušnost, chemické vlastnosti atd.) měřené tekutiny nebo z hlediska správnosti a přesnosti výsledků měření. Důležité jsou také druh proudění (laminární nebo turbulentní), tvar rychlostního profilu v potrubí (kanálu), časové změny měřeného průtoku apod. Všechny tyto okolnosti mají vliv na volbu fyzikálního principu snímače pro danou aplikaci.

1.1 Obecné pojmy

Pojmem tekutina rozumíme společné označení kapalin, par a plynů. Měření objemového průtoku tekutin je v podstatě určování velikosti prostoru, který tekutina zaujímá.

Platí:

$$V = \frac{m}{\rho} = m \cdot V_0 \quad (\text{m}^3) \quad (1)$$

kde :

ρ je hustota ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)

m hmotnost tekutiny (kg)

V_0 měrný objem (m^3)

Průtokem rozumíme objemové, tíhové nebo hmotnostní množství tekutiny, proteklé zvoleným průřezem za časovou jednotku. Pro ustálený objemový a hmotnostní průtok platí:

$$Q_V = \frac{V}{t} = S_V \quad (\text{m}^3) \quad (2)$$

$$Q_m = \frac{m}{t} = Q_{V\rho} = \frac{V_\rho}{t} = S_{V\rho} \quad (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3)$$

v je okamžitá průtočná rychlost v daném průřezu ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

S je průřez potrubí (m^2)

Jestliže není průtok ustálený, platí pro okamžitou hodnotu průtoku:

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Čidly tedy určujeme rychlost proudu nebo objem proleklé kapaliny v určitém časovém intervalu. Pro správnou funkci čidla je důležitý druh proudění.

Při laminárním proudění se částice tekutiny pohybují po drahách, které se navzájem nekříží.

U turbulentního proudění dochází ke křížení jednotlivých drah. Důležitým kritériem, podle něhož určujeme druh proudění, je **Reynoldsovo číslo**. Udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami uvnitř tekutiny. Je definováno vztahem:

$$Re = \frac{D_v}{\nu} \quad (5)$$

D průměr potrubí (m)

v rychlost proudění tekutiny ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

ν kinetická viskozita ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

1.2 Základní dělení

Prostředky používané k měření průtoku a proteklého množství tekutin lze třídit podle různých hledisek. Základní je členění podle použité metody měření. Třídit lze také jinak, podle použitého fyzikálního principu a konstrukce měřidla, druhu měřené tekutiny atd. Třídění podle měřicí metody je však možné z hlediska pochopení funkce a správného výběru měřidla měření pokládat za základní.

Měřicí metody průtoku a proteklého množství tekutin jsou v principu dvě – **objemová a rychlostní**.

1.2.1 Objemová metoda měření průtoku

je založena na definici průtoku Q_v , popř. Q_m jako objemového množství V , popř. hmotnostního množství m tekutiny proteklého za jednotku času, tedy: $Q_v = V/t$,

popř. $Q_m = m/t$, popř. $Q_m = Q_v \cdot r$, kde r je hustota měřené tekutiny.

Průtokoměry pracující objemovou metodou se nazývají **objemové průtokoměry**. Používají se především při přesných měřeních (při kalibraci apod.) a v provozech při bilančních měřeních kapalin i plynů.

1.2.2 Rychlostní metoda měření průtoku

vychází z definice průtoku jako součinu střední rychlosti w proudění a průtočného průřezu S , tedy $Q_v = w \cdot S$, popř. $Q_m = S \cdot w \cdot \rho$. Průtokoměry měřící rychlostní metodou se stručně nazývají **rychlostní průtokoměry**.

Proteklé množství tekutiny – objem V nebo hmotnost m – se určuje buď přímo měřením objemu nebo hmotnosti stejným způsobem a zařízením jako u objemových průtokoměrů, nebo integrací průtoku v časovém intervalu Δt , tedy:

$$V = \int_{\Delta t} Q_v dt \quad (\text{m}^3) \quad (6)$$

$$m = \int_{\Delta t} Q_m dt \quad (\text{kg}) \quad (7)$$

Některé průtokoměry jsou vybaveny integrátorem (počítadlem) a udávají proteklé množství přímo (vodoměry, plynoměry, měřiče tepla apod.). Pro správnou funkci průtokoměru je důležitý druh proudění. Při laminárním proudění se v potrubí vytvoří tzv. úplně vyvinutý rychlostní profil ve tvaru rotačního paraboloidu (s největší rychlostí v ose potrubí).

Při turbulentním proudění je rychlostní profil velmi plochý a tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí. Důležitým kritériem používaným pro posouzení druhu proudění je Reynoldsovo číslo Re , které udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Kritické Reynoldsovo číslo Re_{krit} určuje hranici mezi laminárním a turbulentním prouděním. Pro kruhové potrubí je teoretická hranice $Re_{Dkrit} = 2320$. Je-li $Re_{Dkrit} < 2320$, jedná se o laminární proudění. Při $Re_{Dkrit} > 2320$ jde o proudění turbulentní. Ve skutečnosti je v okolí Re_{Dkrit} určitá přechodová oblast, ve které nelze jednoznačně rozhodnout.

2 SNÍMAČE PRŮTOKU A PRŮTOKOMĚRY

2.1 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.:

druh měření – jednorázové, trvalé, laboratorní, provozní

pracovní činnost – spojitá, nespojitá

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 a jejich rozměry a jiné parametry, přístupnost, náběhové délky atd.

rušivé vlivy snímače – trvalá tlaková ztráta, časové zpoždění údaje

vyhodnocení – průtoku nebo proteklého množství objemového nebo hmotnostního, parametry tekutiny, předvolba, signalizace

přesnost (chyby) měření – bez korekcí nebo s korekcemi.

možné opotřebení a změny v čase (mechanických dílů, popř. vlastností, hodnot parametrů).

Dosažitelnou přesnost měření a konstrukční variabilitu snímače výrazně omezují ovlivňující veličiny tekutiny (např. tlak, teplota) a jejich změny. Pro extrémní parametry tekutiny jsou konstruovány snímače, které i v těchto podmínkách pracují velmi přesně. Některé typy snímačů přitom vyžadují určité vlastnosti měřicích trátí (průměr potrubí, uklidňující délky před snímačem a popř. za snímačem, svislé nebo vodorovné potrubí apod.).

Dynamické vlastnosti snímačů jsou velmi důležité např. při měření proměnného průtoku. Spolehlivost funkce snímače a tím i jeho dlouhodobá provozuschopnost jsou do značné míry dány použitým fyzikálním principem. Z tohoto hlediska jsou výhodné snímače bez pohyblivých částí. Spolehlivost je velmi důležitá především v těch případech, kdy je výměna poškozeného snímače velmi obtížná nebo zcela nemožná (např. provoz s prostředím s ionizujícím zářením). Z hlediska výměny snímače je vždy rozhodující jednoduchost montáže a demontáže.

2.2 Objemové snímače

Objemové měřicí metody řadíme mezi absolutní měřicí metody. Vykazují se velkou přesností měření a udávají celkové množství tekutiny protečené průtokoměrem. Pro měření průtoku v systémech průmyslové automatizace jsou používány objemové měřidla s nespojitou a spojitou měřicí činností. Nespojitá měřidla jsou určena pro místní měření, jako např. zvonový průtokoměr. Průtokoměry se spojitým měřením objemu protékající látky používané v praxi mají konstrukční uspořádání : bubnové, pístové, rotační, lopátkové.

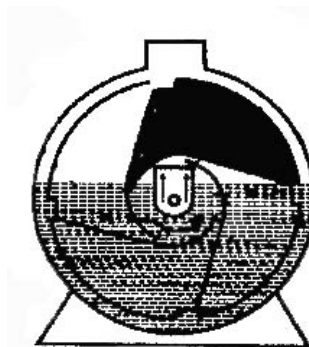
Objemové průtokoměry podle konstrukce:

zvonové – nespojité (s přerušovanou činností), pro plyny: jsou určeny pro laboratoře, pro nejpřesnější měření

bubnové – spojité (s nepřerušovanou činností), pro plyny i kapaliny: měřicí rozsah pro kapaliny je $0,1$ až $7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ při přesnosti ± 1 .

2.2.1 Bubnové snímače

Bubnové měření se používá pro objemové měření tekutiny odměrné komory s možností rotace kolem osy. Vodorovně otočný buben je rozdělen přepážkami na tři stejné komory (1,2,3). Měřená kapalina je přiváděna do středu komory, vtéká do komory V1 a naplňuje ji. Po jejím naplnění se naruší rovnováha buben se otočí o 120° a objem V1 přeteče do výtokové části.



Obr.1. Bubnové čidlo

Měřicí proces pokračuje naplňováním další komory. Omezení měření udává maximální teplota do 130°C a tlak přivodní. Rozsah měření je dán průměrem bubnu až $10000 \text{ m}^3/\text{hod}$. Otáčení je spojeno s mechanickým počítadlem, nebo impulsním snímačem. Pro správnou funkci je nutné odvzdušnění odměrných komor.

2.3 Rychlostní snímače

Rychlostní snímače průtoku jsou v provozech nejpoužívanější. Je jich velké množství druhů, konstrukcí a provedení s různými druhy výstupních signálů, korekčních obvodů apod. Jednotlivé typy rychlostních snímačů průtoku se liší způsobem měření střední rychlosti proudění. Používají se průtokoměry:

plováčkové – s kuželovitou trubicí a rotujícím plováčkem nebo s válcovitou trubicí a kuželovitým trnem a dutým plováčkem, trubice musí být orientována pouze svisle: rozsah do $70 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ u kapalin až do $3\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ u plynů, statický tlak do 5 MPa (podle konstrukce);

lopatkové a šroubové (turbínové) – pro kapaliny (vodoměry): snímají se otáčky rotoru s lopatkami, a to dotykově (mechanické převody) nebo bezdotykově (Hallowa čidla, indukční čidla apod.); turbínové – pro kapaliny: přesnost $\pm 0,5 \%$ v rozsahu od 10 do 100 % jmenovitého průtoku, tlak až 250 MPa, snímání otáček lopatkového rotoru bezdotykově; délka přímého potrubí před snímačem 15D a za snímačem 5D.

průřezová měřidla průtoku – především pro páry a plyny: vírové průtokoměry jsou jednoduché, s velkou přesností, velkým měřicím rozpětím, velmi malou trvalou tlakovou ztrátou, dlouhodobou stabilitou a dlouhou dobou života a výstupem frekvenčním nebo proudovým; vířivé průtokoměry mají, až na velkou trvalou tlakovou ztrátu, stejné vlastnosti jako vírové, výstupem je signál ze snímače tlaku nebo z termistoru;

indukční – pouze pro elektricky vodivé kapaliny, včetně tekutých kovů: velmi vhodné pro širokou oblast použití při světlosti potrubí od 0,002 do 2 m, neobsahují pohyblivé části, mohou pracovat v libovolné poloze a měří při obou směrech proudění;

ultrazvukové – dotykové a bezdotykové, hlavně pro kapaliny ve velkých potrubích: využívá se unášení ultrazvukového signálu proudící tekutinou, změny rychlosti šíření tohoto signálu tekutinou (pro relativně čisté tekutiny), popř. odrazu signálu od překážky v proudu tekutiny (např. vzduchových bublin nebo nečistot); měřené rychlosti proudění do $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ při teplotě do $260 \text{ }^\circ\text{C}$; světlosti potrubí od 0,006 do 3 m; nutné přímé úseky potrubí před snímači.

průřezové (škrticí orgány) – normovaná clona, dýza, Venturiho dýza, Venturiho trubice, čtvrtkruhová dýza, dvojité clona a pro znečištěné tekutiny a kaly segmentová clona: výstupním signálem je rozdíl tlaků, vyvolávají trvalou tlakovou ztrátu;

rychlostní sondy – Pitotova a Prandtlova trubice k měření okamžité rychlosti proudění a výpočtu střední rychlosti; několikaotvorové sondy k přímému měření střední rychlosti proudění

a tím i průtoku se zasouvají kolmo na směr proudění v potrubí: na náběžné straně jsou čtyři, šest, osm i více otvorů ke snímání střední hodnoty celkového tlaku a na odtokové straně jeden (popř. stejný počet jako na náběžné straně) otvor ke snímání tlaku v úplavu; jsou vhodné především v potrubích velkých světlostí, vyvolávají nepatrnou trvalou tlakovou ztrátu a deformace rychlostního profilu nemá vliv na přesnost měření;

hmotnostní (Coriolisovy) – pro kapaliny, páry i plyny: snímač využívá značně zúžené trubice tvaru U, popř. $\square$, a to jednoduché nebo vícenásobné, popř. i přímé protékané měřenou tekutinou; trubice se nuceně rozkmitává a snímají se časové posuny vzniklých kmitů úměrné hmotnostnímu průtoku; jsou příčinou velké trvalé tlakové ztráty; měřicí rozsahy sahají od $3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ do $18\,000 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$, přesnost $\pm 0,1 \%$, teplota od -240 do $+200 \text{ }^\circ\text{C}$, tlak až 30 MPa ;

2.3.1 Plováčkové snímače

Silovým účinkem tekutiny a gravitační síly je měněna poloha pohyblivé části čidla.

Výstupním signálem u těchto čidel je změna plochy, výchylka. Tento typ čidel se používá v automatizační technice velmi často. Principem plovákového čidla je plovák, umístěný ve svislé kuželové trubici protékané tekutinou, je nadnášen a jeho zdvih je úměrný průtoku. Pro průtočné množství platí:

$$Q_v = (S_1 - S_2) k \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_v}} = K(a h + b h^2) \sqrt{\frac{P_p - P_v}{P_v}} \quad (8)$$

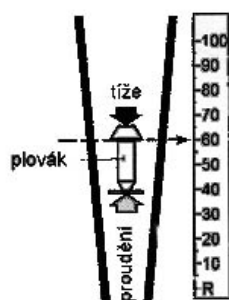
$(S_1 - S_2)$ je průtočný průřez (mezi trubicí a plovákem)

$P_1 - P_2$ je tlakový spád plováku

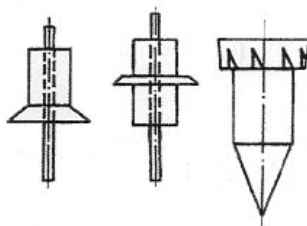
K, k, a, b konstanty

P_v hustota měřené tekutiny

P_p hustota materiálu plováku



Obr.2. Plovákové čidlo



Obr.3. Základní tvary plováků

Průtočný průřez u plovákového čidla je proměnný, tlakový spád se nemění. Vyžaduje se vysoká přesnost a stabilní poloha plováku. Plováková čidla se používají pro měření objemových průtoků tekutin od $0,1 \text{ dm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ do $10^3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, při teplotách v rozsahu -180 až $+500 \text{ }^\circ\text{C}$, tlacích do 30 MPa a chybě měření 1 až 4 % z měřícího rozsahu.

Výhody - levné a jednoduché měřidlo, odolné proti agresivnímu prostředí.

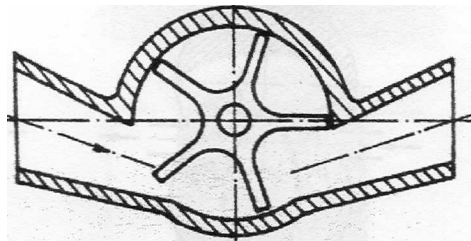
Nevýhody - použití pouze pro konkrétní hustotu a viskozitu, nižší přesnost měření.

2.3.2 Lopatkové a šroubové (turbínové) snímače

Princip lopatkového čidla

Osa otáčení rotoru je kolmá na osu přívodního kanálu. Dále je osa otáčení rotoru rovnoběžná s plochou lopatek. Proudící tekutina je přiváděna k lopatkovému kolu jedním (vtokovým) kanálem a druhým (výtokovým) je odváděna. Tato čidla bývají označována též jako jednoproudá. Při otáčení kola vznikají hydrodynamické ztráty a ztráty třením v úložných částech kola. Proto je obvodová rychlost kola menší než rychlost přitékající tekutiny. Zpoždění kola za rychlosti kapaliny není stálé, ale zvětšuje se s klesající rychlostí protékající kapaliny. Tuto chybu lze zmenšit vhodnou konstrukcí čidla. Zároveň je určeno minimální průtočná množství čidla. Lopatková čidla nejsou vhodná pro měření tekutin s větší viskozitou. U jednoproudových čidel se někdy používá regulační desky, která je umístěna uvnitř komory vedle lopatkového kola. V

závislosti na poloze desky (úhlovém natočení) vzhledem ke vstupnímu a výstupnímu otvoru se dosáhne zvětšení nebo zmenšení hydraulického odporu a úpravy charakteristiky čidla.



Obr.4. Lopatkový snímač

Princip šroubového čidla

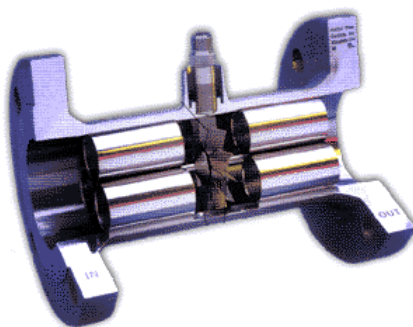
U šroubová (turbínková) čidla je osa otáčení rotoru shodná s osou vstupního a výstupního potrubí. Rotor má tvar několikachodého šroubu. Na vstupní straně čidla bývá někdy stavitelné křídélko, kterým lze čidlo nastavit. Tato čidla bývají někdy uváděna pod označení Woltmannova. Šroubová čidla jsou vhodná pro měření větších průtočných množství. Vyrábějí se ve velmi širokém sortimentu, světlost průtok. potrubí je od 3 mm do 1 m.

Turbínková čidla pracují spolehlivě při teplotách od -200 do +700 °C a tlaku až 250 MPa.

Lze jimi měřit všechny kapaliny o kinematické viskozitě. Přívodní potrubí před čidlem musí být rovné v délce nejméně 15D, za čidlem pak 5D (D je průměr potrubí), jinak dochází ke zvětšení chyby. Snímání otáček šroubového kola se dělá většinou bezdotykově. Velkou výhodou rychlostních čidel je impulsní výstupní signál.

Turbínový průtokoměr firmy Hoffer

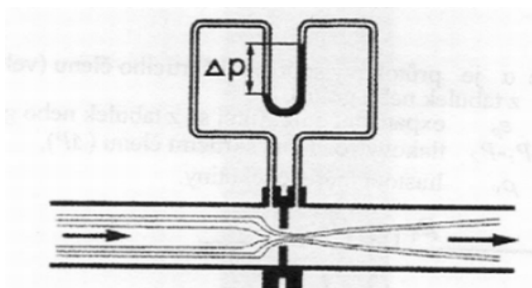
Základem turbínového průtokoměru je kovový rotor. Osa rotoru je orientovaná rovnoběžně se směrem toku tekutiny. Protékající tekutina působí na šikmé lopatky rotoru a roztáčí ho. Pohyb rotoru je snímán bezkontaktně magnetickým snímačem uloženým vně tělesa průtokoměru. Výstupem z magnetického snímače je frekvenční signál přibližně sinusového průběhu. Jeho frekvence je řádově stovky Hz a je přímo úměrná okamžitému průtoku.



Obr.5. Turbínkový průtokoměr

2.3.3 Průřezové snímače

V automatizační technice jsou tato čidla používána velmi často. Vytvářejí rozsáhlou skupinu s různými typy škrticích členů, které jsou normalizovány. U této skupiny je Průtočný průřez stálý a mění se rychlost protékající tekutiny, která se na škrticím členu převádí na rozdíl tlaku nebo teploty. Škrticí orgány jsou normalizovány. Nejčastěji se používají **clona**, **dýza**, **Venturiho dýza** a další. Uspořádáním škrticího členu může být jednoduchá nebo vícenásobné (můstková). Jako měřené médium může být kapalina, plyn i pára. Průtokoměry nepoužívají žádné mechanické rotační díly. Mohou být i přetíženy. Podmínkou je čisté médium, které se nesmí při změně tlaku měnit. Další podmínkou je dodržení rovného průřezu potrubí v dostatečné vzdálenosti před a za místem průtokoměru.



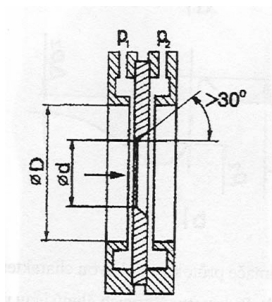
Obr.6. Princip měření průtoku pomocí clony

Clona

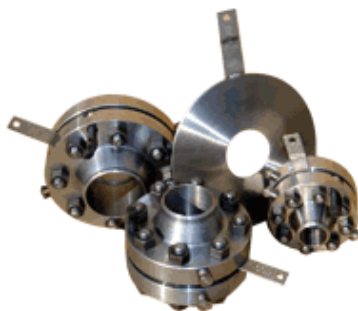
Nejjednodušším a nejčastěji používaným škrticím členem je clona pro kruhová potrubí. Malá délka umožňuje snadnou montáž a výměnu. Clona způsobuje poměrně velkou tlakovou ztrátu. Clona se montuje do přímé části potrubí dostatečné délky (asi 15D před clonou a 5D za clonou). Uklidňující dráha musí být tím větší čím větší je poměrné zúžení. Tlaková odběry mohou být realizovány buď jako bodové jediný tlakový odběr před clonou a jediný za clonou), nebo jako

komorové (několik otvorů po obvodu, popř. štěrбина po celém obvodu s prstencovou sběrací komorou).

Komorové odběry se používají u clon pro světlosti potrubí do 300 mm. Požadavky na přesnost provedení clony jsou vysoké.



Obr.7. Normalizovaná clona s komorovým odběrem tlaků



Obr.8. Druhy clon



Obr.9. Druhy clon

Dýza

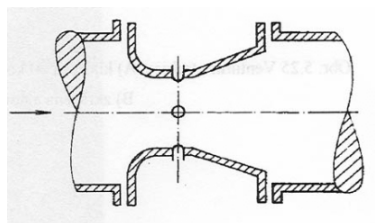
Druhým škrticím členem je dýza. Její tvar je složitější než u clony. Proto je její použití méně časté. Dýzou lze měřit průtok tekutin v potrubí o světlosti od 50 do 500 mm, při poměrném zúžení 0,05 až 0,64. Dýza se používá všude tam, kde jsou větší požadavky na přesnost.



Obr.10. Příklad dýzy

Venturiho dýza

je dalším často používaným škrticím členem. Vznikne napojením difuzoru na normalizovanou dýzu. Nevýhodou Venturiho dýzy je značná stavební délka a náročná výroba. Používá se pro měření průtoku tekutin v potrubí o světlosti od 50 do 500 mm, při poměrném zúžení 0,05 až 0,6. Tlaková ztráta je nejmenší. Dýza se vyrábí zkrácená, s menším konečným průměrem difuzoru, než má průměr potrubí, nebo dlouhá, s difuzorem o průměru shodném s průměrem potrubí.



Obr.11. Princip Venturiho dýzy



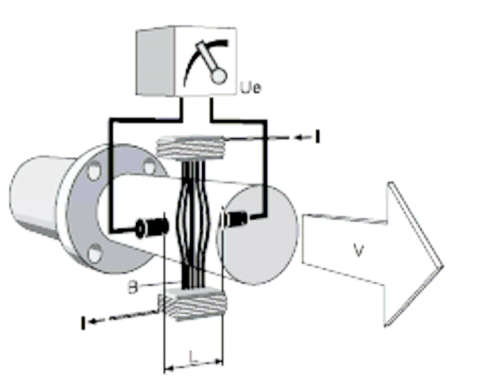
Obr.12. Venturiho trubice

Ostatní průřezová čidla

Mezi další škrticí členy patří pro malá Reynoldsova čísla dvojité seříznutá clona, polokruhová dýza bez válcové části, dvojclona apod. Pro znečištěné tekutiny jsou vhodné segmentová clona, excentrická clona, šterbinová clona. Mezi průřezová čidla patří také laminární čidlo pro měření velmi malých průtoků.

2.3.4 Indukční snímače

Indukční průtokoměry využívají platnost Faradayova zákona. Ve vytvořeném magnetickém poli je pohyb vodiče nahrazen tokem elektricky vodivé kapaliny a indukované napětí je snímáno na elektrodách. Indukční čidla jsou určena pro měření elektrických vodivých kapalin. Jejich činnost je založena na pohybu fiktivního vodiče kapaliny v magnetickém poli, přičemž se ve vodiči indukuje napětí úměrné rychlosti tohoto vodiče. Princip čidla je naznačen na obr. Vodič, který je vytvořen sloupcem kapaliny délky l , se pohybuje ve směru rychlosti v , přitom protíná siločáry magnetického pole s indukci B . Napětí naprázdno, indukované ve fiktivním vodiči, je (za předpokladu všech vektorů navzájem kolmých)



Obr.13. Princip indukčního snímače

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (V)$$

B je vektor magnetické indukce (T)

v vektor rychlosti fiktivního vodiče ($m \cdot s^{-1}$)

l délka vodiče (vzdálenost elektrod) (m)

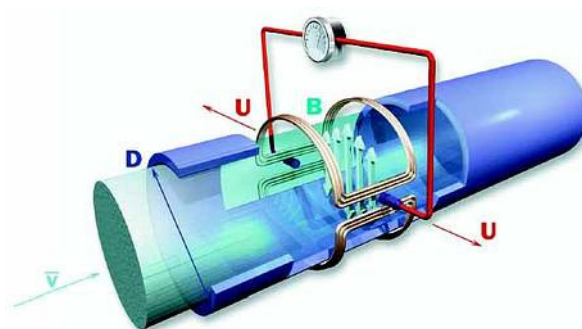
Indukční čidla průtoku lze rozdělit podle:

-řešení a použití průtokové čidlo (kruhový, obdélníkový kanál)

válcové čidlo ponorné, plošné čidlo (stěnové), bodové čidlo.

-magnetického pole stejnosměrné, střídavé a impulsní

Pokud je průtokový kanál kovový, musí být vyplněn izolační vložkou. Elektrody musí být od trubky izolovány. Dále je nezbytné, aby trubka byla z nemagnetického materiálu, aby nedošlo ke zkratu magnetického toku.



Obr.14. Indukční průtokoměr

Elektrický obvod čidla

Podle předcházejícího výkladu se chová indukční čidlo průtoku z hlediska výstupu jako generátor napětí, jehož vnitřní odpor je dán vodivostí měřené kapaliny. Při měření tohoto napětí je nezbytné, aby vstupní odpor milivoltmetru byl větší než odpor kapaliny mezi elektrodami. Při střídavém buzení magnetického obvodu čidla se bude indukovat v závitě, který vytváří „fiktivní vodič“ kapaliny s přívody, tzv. statické (transformátorové) napětí, i když bude rychlost tekutiny nulová. Toto parazitní napětí je stejného kmitočtu jako užitečný signál, avšak je o 90° posunuto. Toto napětí a další parazitní signály různé frekvence a amplitudy musí být vhodnou konstrukcí potlačeny. Zpracování signálů na výstupu čidla je obtížné též proto, že se jedná o poměrně malá střídavá nebo stejnosměrná napětí velikosti desetina až jednotek milivoltů.

Použití

Především musí být splněn základní požadavek elektrické vodivosti měřené kapaliny.

Vzhledem k tomu, že lze konstruovat zesilovače je možné měřit kapaliny i s velmi malou vodivostí. Čidla se vyrábějí s průměry potrubí od 2 mm do 2 m. Indukční čidla neobsahují pohyblivé části, lze jimi měřit v libovolné poloze, měří v obou směrech. Hydraulický odpor je minimální. Znečištění měřeného média nemá prakticky vliv na přesnost měření. Měření s tímto čidlem je v širokém rozsahu nezávislé na změnách fyzikálních vlastností kapaliny (tlaku, teplotě, hustotě apod.). S přihlédnutím k uvedeným vlastnostem představují indukční čidla průtoku téměř ideální čidlo. Jsou proto velmi vhodné pro využití v automatizační technice a robotice, především při práci v extrémních podmínkách (těžká chemie, jaderná technika apod.)

2.3.5 Ultrazvukové snímače

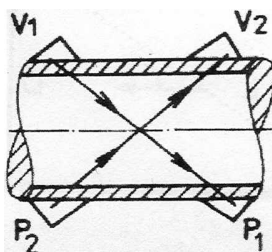
Používají se většinou pro měření průtoku tekutin v potrubích většího průměru. Nemají pohyblivé části. Používá se ultrazvuku o frekvencích 20 kHz až do 1000 kHz. Měří bezdotykově nemají pohyblivé části a nezvětšují hydraulický odpor. Kapaliny mohou být silně znečištěny, agresivní, viskozní a mohou být i výbušné.

Princip

Ultrazvukovým snímačem je vysílán ultrazvukový signál do proudu tekutiny a po průchodu tekutinou zpět přijímán. Snímač tedy obsahuje zdroj (vysílač) ultrazvukového signálu a čidlo ultrazvukového signálu a při tom platí vztah:

$$\tau_{a-b} = \frac{L}{c - v \cdot \cos \alpha} \quad (9)$$

kde: τ_{a-b} doba průchodu signálu
 c rychlost ultrazvuku v tekutině
 L vzdálenost a-b
 v průměrná rychlost tekutiny
 α úhel sklonu paprsku



Obr.15. Ultrazvukový snímač

Dělení

Podle skupin ovlivnění ultrazvukového signálu můžeme rozdělit snímače do těchto skupin:

- snášení ultrazvukového signálu proudem tekutiny;
- změna rychlosti šíření proudem tekutiny;
- odraz ultrazvukového signálu v proudě tekutiny (Dopplerův jev);

Základní typy ultrazvukových snímačů

Snímač využívající snášení ultrazvukového signálu tekutinou je na obr. Ultrazvukový signál je vysílán zdrojem V napříč potrubím na dvě samostatná čidla P1 a P2. Při nulové rychlosti jsou oba signály stejné. Průtokem měřeného média dochází ke snášení dílčích ultrazvukových signálů, takže se na výstupu čidel P1 a P2 vytvoří nesymetrie úměrná průtoku. Signál ze zdroje V1 je vysílán do potrubí ve směru proudění tekutiny a je přijímán čidlem P1. Druhý kanál je nastaven tak, že ultrazvukový signál je vysílán ze zdroje V2 proti směru proudění tekutiny a je přijímán čidlem P2. Platí, že výsledná rychlost šíření je dána vektorovým součtem rychlosti šíření ultrazvuku c a rychlosti tekutiny v . Pro první kanál platí:

$$v_1 = c + v \cdot \sin a \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (10)$$

Pro druhý kanál

$$v_2 = c - v \cdot \sin a \quad (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (11)$$

Toto uspořádání snímače je nejčastější. Používá se jak pro měření kapalin, tak plynů.

Třetí možné řešení ultrazvukového snímače průtoku využívá Dopplerova jevu. Lze ho použít pouze pro měření průtoku tekutin, které obsahují částice pevné látky. Jeho činnost spočívá v tom, že ultrazvukový signál ze zdroje V, který se pohybuje rychlostí v , se odráží od částic. Odražený signál je přijímán čidlem P. Frekvence přijímaného ultrazvukového signálu se mění a závisí na rychlosti v . Pro rozdíl frekvence vysílaného a přijímaného ultrazvukového signálu platí:

$$D_f = \frac{2fv}{c} \quad (\text{Hz}) \quad (12)$$

f je frekvence vysílaného ultrazvukového signálu (Hz)

c rychlost šíření ultrazvuku ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

v střední rychlost proudící kapaliny ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Tento typ snímače má obvykle spojen zdroj ultrazvukového signálu a čidlo v jeden

konstrukční celek. Dopplerovy snímače jsou vhodné pouze pro některé speciální aplikace.

Zdroj ultrazvukového signálu a čidlo mohou být na měřenou tekutinu navázány buď přímo, nebo přes stěnu potrubí.

Použití

Ultrazvukový snímač vyžaduje poměrně složité elektronické vyhodnocení signálu. Používá se pro měření kapalin a plynů v potrubích o průměru jednotek milimetrů až 2 m. Dosahovaná přesnost je až $\pm 0,5\%$. Vyrábějí se snímače pro tlaky 10 MPa a vyšší. Průtokové rychlosti jsou v rozsahu od $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Snímač prakticky nezvětšuje odpor potrubí. Může pracovat v libovolné poloze, nemá pohyblivé části. Z těchto důvodů se jeví jako velmi vhodný pro některé aplikace v automatizovaných systémech.

2.3.6 Vírové průtokoměry

Vycházejí z principu měření frekvence vírů, které vznikají při obtékání tělesa v proudící tekutině. Překážkou je trn s trojúhelníkovým, nebo lichoběžníkovým průřezem. Při obtékání se vytváří víry. Frekvence těchto vírů je (50 až 2500 Hz) a jejich počet je přímo úměrný rychlosti proudění. V tělese průtokoměru je umístěn snímač vibrací. Používá se pro kapaliny, plyny i páry. Jediné omezení je teplota měřeného média do 280°C .

Na stabilitu tvorby vírů má vliv tvar překážky a rychlost proudění. Frekvence vírů není závislá na hustotě a viskozitě tekutiny, na teplotě a tlaku média, na vibracích potrubí a na chemickém složení tekutiny. Snímání frekvence vírů se provádí ultrazvukovým, optickým, tepelným nebo tlakovým senzorem. Ultrazvukový senzor snímá odrazy z generátoru a je umístěn na vnější straně průtokoměru v místě za překážkou, kde je největší počet vírů. Musí být vyplněn celý prostor průtokoměru tekutinou a zajistit rovný úsek před průtokoměrem $10D$ a $5D$ za průtokoměrem. Vírové průtokoměry jsou od průměru 10 mm do 300 mm. Přesnost měření pro kapaliny je 0,6% a pro plyny a páry 1%.

2.3.7 Coriolisovy průtokoměry

Je to průtokoměr pro přímé měření průtoku ve hmotnostních jednotkách. Pro měření hmotnostního průtoku je v poslední době nejpopulárnější metoda využívající Coriolisova principu, která je často považována za nejpresnější metodu průmyslového měření hmotnostního průtoku. Velikost Coriolisovy síly se vyhodnocuje nepřímo podle velikosti deformace měřicí trubice, kterou způsobuje a která je úměrná hmotnostnímu průtoku média trubicí. Možnosti měření. Základním citlivým prvkem Coriolisova průtokoměru je kmitající tzv. měřicí trubice,

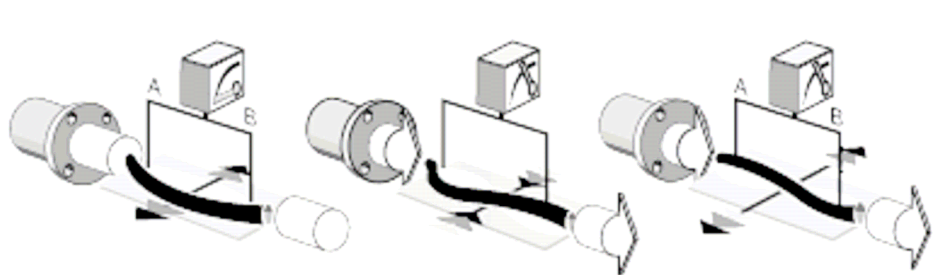
kterou protéká měřené médium. Při pohybu média trubicí dochází, v důsledku působení Coriolisovy síly, k asymetrické deformaci trubice přímo úměrné velikosti hmotnostního průtoku média. Coriolisův průtokoměr (na obr. 1 v základním provedení s několikrát zakřivenou měřicí trubicí) má jeden nebo dva budiče oscilací a dva snímače pohybu (umístěné tak, aby snímaly pohyby trubice).

Nejvýznamnější výhodou Coriolisových průtokoměrů je, že měří přímo hmotnostní průtok. K přednostem Coriolisových průtokoměrů dále patří zejména velká přesnost měření (až 0,1 %) Naopak mezi nedostatky patří nezbytnost zvláštního napájení a poměrně vysoká cena. Měření průtoku ve hmotnostních jednotkách využívá princip časové změny momentu hybnosti od Coriolisovy síly.

Platí vztah:

$$\Delta F_c = 2 \cdot \Delta m \cdot (v \cdot \omega) \quad (13)$$

F_c	Coriolisova síla
ω	úhlová rychlost
v	rychlost proudění



Obr.16. Princip Coriolisova převodníku

3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKŮ

3.1 Podle druhu měřené tekutiny

Při výběru průtokoměru musíme zvážit jaký druh tekutiny budeme měřit. Důležitým kritériem při objemovém měření průtoku kapalin je hustota kapaliny ρ . Dalším, ne méně důležitým kritériem je čistota měřené kapaliny - měření agresivních chemikálií (kyselin, louhů..) a jiných druhů kapalin používajících se v průmyslu.

Bubnové průtokoměry - kapaliny, plyny

Turbínové průtokoměry - čisté a viskózní (do $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$) kapaliny, čisté plyny

Lopátkové průtokoměry - čisté, neagresivní, neviskózní kapaliny

Průtokoměry s oválnými koly - čisté a viskózní ($3 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) kapaliny

Průřezová měřidla - kapaliny, plyny, páry

Plováčkové průtokoměry - čisté, neagresivní kapaliny

Ultrazvukové průtokoměry - kapaliny vodivé, nevodivé, znečištěné, agresivní, viskózní, výbušné

Indukční průtokoměry - vodivé kapaliny (větší než $5 \cdot 10^{-6} \text{ S} \cdot \text{m}^{-2}$)

Termoelektrické průtokoměry - kapaliny a plyny

Vírové průtokoměry - kapaliny, plyny a vodní páry

Coriolisovy průtokoměry - kapaliny - složité reologické vlastnosti (kaly, tekutý asfalt)

V otevřených kanálech – kapaliny

Příklady průtokoměrů aplikovaných v průmyslu od firmy Krohne

Chemický průmysl - Altoflux: chemická čistírna odpadních vod

Altoflux: plnění koncentrované kyseliny dusičné do cisteren

BM 100A: měření polystyrenového granulátu

BM 70A: aplikace měření asfaltu

Hutnictví, strojírenství - DW 182: mazání pod kontrolou

Měření demineralizované vody v elektrárně

Energetika, vytápění - FA 20: kontrola funkce systému na měření emisí

Výroba papíru a celulózy - MB 100A: měření výšky hladiny popílku

Magneticko indukční průtokoměry v papírnách

Kontrola průtoku mazacího oleje, potravinářství, námořní doprava, hornictví, úprava rud, měření uhelných kalů, petrochemie a kapalné plyny, farmacie

3.2 Podle rozsahu teploty média, rozsahu a nejistoty měření

Zvonové – pro nejpřesnější měření, laboratoře

Bubnové průtokoměry – rozsah je dán průměrem bubnu 0,1 až 7000 m³/h pro kapaliny při přesnosti ± 1 %, pro plyny 0,25 až 25 m³/h – laboratorní typy a 30 až 104 m³/h při přesnostech $\pm 0,2$ až ± 1 %, max. teplota do 130 °C

Turbínové průtokoměry – min. rozsah od 10 % do 100 % rozsahu celkového průtoku, tlak až 250 MPa, snímání otáček bezdotykově, délka přímého potrubí před snímačem 15 D, max. teplota do 130 °C, třída přesnosti $\pm 0,5$ %

Lopatkové průtokoměry – min. rozsah od 10 % rozsahu celkového průtoku, max. teplota do 130 °C, třída přesnosti 2 %

Průtokoměry s oválnými koly – max. teplota do 150 °C, třída přesnosti 0,6 % (speciální provedení 0,16 %),

Průřezová měřidla průtoku – rozsah 10 – 15 % jmenovitého průtoku, teplota od -200 až 500 °C, třída přesnosti 1 %

Plováčkové průtokoměry – rozsah u kapalin od $1,2 \cdot 10^{-7}$ do 45 m³/h, u plynu od $1,5 \cdot 10^{-5}$ do 1900 m³/h, teplota do 400 °C, třída přesnosti 1-2 %

Ultrazvukové průtokoměry – světlost potrubí 0,006 až 3 m, teplota do 260 °C, třída přesnosti 0,25 % až 0,6 %,

Indukční průtokoměry – světlosti potrubí 0,002 až 2 m, teplota do 250 °C, třída přesnosti 0,25 % až 0,6 %

Termoelektrické průtokoměry – teplota 10 až 70 °C, třída přesnosti 1 %

Vírové průtokoměry – teplota do 280 °C, třída přesnosti 0,6 % pro kapaliny, 1 % pro plyny

Coriolisovy průtokoměry – měřicí rozsah od 3 kg/h až 18 000 kg/h, teplota -240 až +200 °C, přesnost $\pm 0,1 \%$

V otevřených kanálech – pro velké průtoky, třída přesnosti 2,5 až 6 %

Výběr průtokoměrů provádíme podle katalogových listů výrobce s ohledem na požadavky měřeného média (teplota média, max.průtočné množství, přesnost, rozsah měření, životnost, druh měřené látky, cena, údržba a dalších parametrů).

3.3 Nejistota měření

3.3.1 Kalibrace

Každý přístroj je samozřejmě kalibrován ve výrobním závodě. Stejně samozřejmě je ho však třeba za provozu periodicky kontrolovat následnými kalibracemi. Opět zde obecně platí, podobně jako v případě údržby, že přístroje s pohyblivými částmi jsou náročnější a vyžadují četnější kalibraci. Kalibrovat je nutné všechny části měřicího řetězce.

Doba mezi nejbližší následujícími kalibracemi je dána buď zákonným předpisem (je-li přístroj je určen pro fakturační účely), nebo metrologickým předpisem uživatele. Nejčastěji se požaduje kalibrace každé dva až tři roky.

3.3.2 Chyba přístroje

Ve všech prospektech se výrobci průtokoměrů předhánějí v údajích o dosažené odchylce údaje přístroje od skutečné hodnoty průtoku, kterou samozřejmě uvádějí co nejmenší. V aplikacích, kde každou hodinu protéká potrubím médium za statisíce korun, má každá desetinka procenta odchylky svůj význam. Je nutné si také uvědomit, že nejistoty měření v laboratoři a v provozu se liší. Do výsledné nejistoty měření průtoku se započítávají i nejistoty zapříčiněné ostatními články řetězce (měření tlaku a teploty). Nemají-li při měření jakékoliv veličiny vznikat zbytečně se opakující chyby a větší než nezbytně nutné náklady, je vhodné používat různé spolehlivé způsoby instalace měřicích přístrojů a měřicí postupy které jsou vyzkoušeny.

3.3.3 Nejistoty měření

U měřicích přístrojů jsou udávány výrobci přesnosti měření, rozlišení, citlivosti, apod. Ne vždy jsou tyto pojmy vykládány jednoznačně, hlavně u měřicích přístrojů s digitálním vyhodnocením naměřených hodnot. K tomu přistupují ještě, v současné době používané, nejistoty měření, pracovní chyby, apod. Pojem nejistoty měření byl zaveden v letech 1981 - 85 na zasedání

Mezinárodního výboru pro míry a váhy. V roce 1993 vydala Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) první příručku pro určování nejistot měření. Kromě teoretického obsahu a praktických ukázek výpočtu nejistot měření příručka nedoporučuje používat pojmy jako jsou chyba měření nebo správná hodnota měřené veličiny. V normě je prezentována měřená hodnota jako střední prvek souboru, který představuje měřenou veličinu a nejistotu měření jako parametr přiřazený k výsledku měření. Nejistota měření je rozptýl hodnot, které lze pokládat za hodnotu veličiny, která je objektem měření. Parametrem (nejistotou měření) může být směrodatná odchylka nebo její násobek. Obecně představuje nejistota měření více složek. Některé složky mohou být získány ze statistického rozložení výsledku měření, jiné z předpokládaného pravděpodobnostního rozložení. Nejistoty měření vykazují všechny součásti měřicího řetězce: měřicí přístroje, měřicí metody, etalony, měřicí obvody, apod. Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je standardní nejistota. Podle způsobu vyhodnocení lze rozdělit standardní nejistotu na nejistotu typu A a nejistotu typu B. Dále lze rozdělit standardní nejistoty na nejistoty přímých a nepřímých měřicích metod.

Standardní nejistota typu A

Standardní nejistota typu A je označována symbolem u_A . Je stanovena na základě statistické analýzy více opakovaných měření, podobně jako u náhodných chyb. Příčiny těchto nejistot jsou považovány za neznámé a při daném souboru měření s počtem měření jejich hodnoty klesají. Při vyhodnocení nejistoty typu A je vhodné mít k dispozici větší soubor naměřených hodnot. Obsahuje-li soubor měření např. pouze 10 hodnot a méně je standardní nejistota stanovena metodou A málo spolehlivá.

Standardní nejistota typu B

Standardní nejistota typu B s označením u_B je získána jiným způsobem než ze statistického vyhodnocení souboru měření. Vyhodnocuje se pro jednotlivé zdroje nejistot a je obdobou systematických chyb. Systematickou chybu je možno vyjádřit jako složku chyby měření, která zůstává při opakovaných měřeních stálá nebo se mění předvídatelným způsobem. Mezi systematické chyby lze zařadit chybu metody, chybu měřicího přístroje, vliv oteplení, chybu nuly, zesílení apod. Standardní nejistota typu B se určuje na základě údajů výrobců používané měřicí techniky, metodiky měření, zkušeností z předchozích měření, údajů získaných z kalibračních protokolů, nejistot referenčních údajů apod. Pokud je výsledné měření ovlivňováno více prvky ovlivňujícími celkový výsledek měření je standardní nejistota typu B určena výrazem zahrnujícím nejistoty jednotlivých prvků měřicího řetězce. Používáme-li např. měřicí přístroje v

pracovních podmínkách je nejistota typu B určena z parametrů udaných výrobcem měřicího přístroje. V tomto případě je to nepřesnost měřicího přístroje (třída přesnosti u analogového vyhodnocení nebo přesnost přístroje u vyhodnocení digitálního). Na základě získaných informací o přesnosti měřicího přístroje lze určit interval, ve kterém leží s velkou pravděpodobností měřená hodnota.

Kombinovaná nejistota

V mnoha praktických měření nelze stanovit výsledek měření na základě nejistoty typu A nebo nejistoty typu B. Sloučením obou výše uvedených nejistot dostaneme nejistotu kombinovanou která je označena symbolem u_c

4 VÝBĚR PRŮTOKOMĚŘŮ PRO LABORATORNÍ A VÝUKOVÉ ÚČELY

Za účelem měření průtoku v laboratořích musíme pečlivě vybírat průtokoměry s ohledem na přesnost, průtočné množství, druh měřené kapaliny a dalších kritérií které budou odpovídat výuce a laboratorním podmínkám. Výběr průtokoměrů, ventilů a potrubí byl zúžen na firmu Siemens, která spolupracuje s naší vysokou školou. V podmínkách výběru bylo dáno - počet průtokoměrů, druhy průtokoměrů, průměr potrubí. Dále bylo obecně zadáno čerpadlo s daným jmenovitým průtokem a ventil se spojitým ovládáním.

4.1 Potrubí

měděné, světlost ½“, 1“ tj. 13, 26 mm, šroubení, kolena, přechod ½“ na 1“, vnější průměr 15 mm stěna 1 mm, dodávaná délka 5m, vnitřní objem na metr 0,393m, maximální provozní tlak 71 bar. Při proudění vody potrubím dochází vlivem odporů k tlakové ztrátě. Tato ztráta je především závislá na rychlosti proudění vody v_d a to se druhou mocninou, tzn. např. vzroste-li rychlost proudění v_d 2x, zvýší se tlaková ztráta 4x, ale vzroste-li rychlost proudění v_d 3x, zvýší se tlaková ztráta již 9x !!! Pro výpočet tlakové ztráty v potrubí jsem použil program pro tlakové ztráty v potrubí na www.tzb-info.cz

Použití

rozvody pitné vody, teplé a studené užitkové vody, topných olejů a kapalných plynů, tepelná čerpadla, solární zařízení, rozvody požární vody

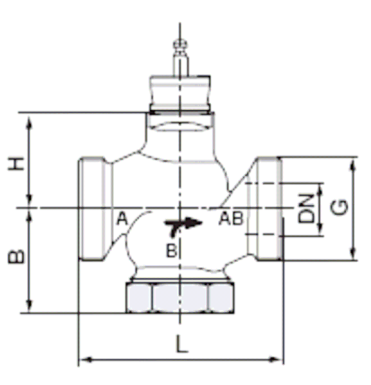
rozvody zemního plynu, plynných uhlovodíků a jejich směsí (propan, butan, bioplyn, atp.) viz technické doporučení TD G 70001 (09/97) vydané GAS s.r.o.

Spojování a tvarování měděného potrubí se provádí buď svařováním (pájením), nebo lisováním. Využijeme k tomu široký sortiment pro spojování a tvarování měděného potrubí pájecí tvarovky a přechodky. Pájky a pasty jsou pomocné materiály, pro spojování měděného potrubí. Správná volba těchto materiálů je určující pro kvalitu spoje.

Proč měděné trubky - měď nestárne a nekřehne, snadná manipulace a montáž, měď je necitlivá vůči změnám teploty a tlaku, měď nezarůstá.

4.2 Regulační dvoucestný ventil se spojitým ovládáním - Typ - H420

Zdvihový ventil dvoucestný DN 20 s rovnoprocentní charakteristikou pro spojitou regulaci malých až velkých výkonů. Vnější závit ISO 228, vnitřní průměr 20 mm, maximální průtok $6,3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Průtok je regulován vnitřní světlostí, zdvihem v mm. Ventil je ovládán servopohonem se spojitým průběhem.



Obr.17. Regulační dvoucestný ventil:

Ventil DN 25 šroubení G 1“ typ ZH425. Dá se ovládat i ručně pomocí šestihranu.

Zdvihový ventil je přestavován zdvihovým pohonem řady NV se spojitou regulací.

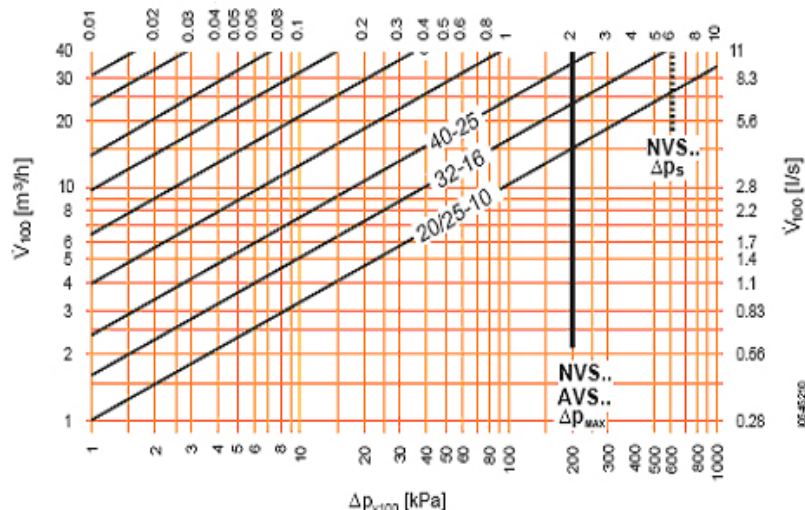
Charakteristika průtoku a tlaku v regulačním ventilu

ΔP_{V100} -diferenční tlak při plně otevřeném ventilu

V_{100} -jmenovitý průtok při ΔP_{V100}

$\Delta P_s - NVS$ -uzavírací tlak, při kterém zdvihový pohon těsně uzavře armaturu, s ohledem na příslušnou hodnotu netěsnosti.

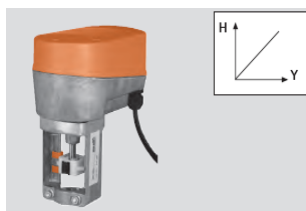
$\Delta P_{\max} - NVS, AVS$ – maximální přípustný diferenční tlak pro dlouhou životnost.



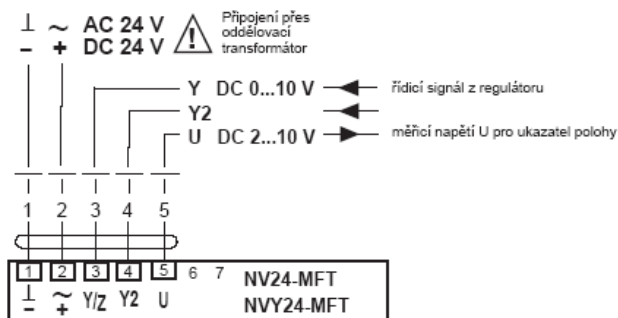
Obr.18. Charakteristika ventilu

Zdvihový pohon pro zdvihový ventil NV24-MFT, od firmy Belimo

Ovládání spojitě řídicím signálem 1-10 V, pohon je jištěn proti zkratu a je chráněn proti přetížení. Pracovní rozsah je 20 mm. Na konzole se mechanicky zobrazuje zdvih a maximální zdvih se nastaví automaticky. Dá se ovládat ručně pomocí šestihranu. Ovládání, pracovní rozsah, zpětné hlášení polohy, doba přestavení a další funkce jsou programovatelné pomocí PC. Katalogové listy jsou na www.belimo.cz



Obr.19. Zdvihový pohon



Obr.20. Schéma připojení

Uzavírací síla je 1000 N, 800 N je přídržná síla.

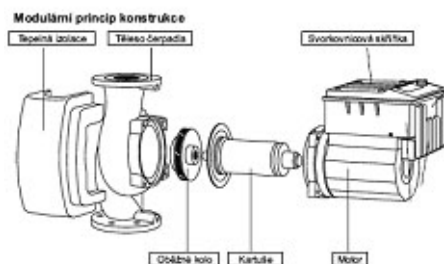
4.3 Čerpadlo

Oběhové čerpadlo UPS, UP Série 25-60 Grundfos ,výtláčné hrdlo 25 mm, max. průtok 5 m³/h při 80 kPa, maximální tlak 5,4 bar při 0,6 m³/h, teplota kapaliny -25°C až +110°C. Budeme předpokládat průtok 2,5 m³/h při rychlosti 1,4 m/s a tlak 350 kPa. Motor napětí 230 V, výkon motoru při prvním, druhém a třetím stupni 45, 65, 90 W. Frekvenční měniče pro spojitou regulaci otáček jsou k dispozici na trhu od výkonu min.150 W, proto se bude regulace průtoku řídit ventilem se spojitým ovládáním.

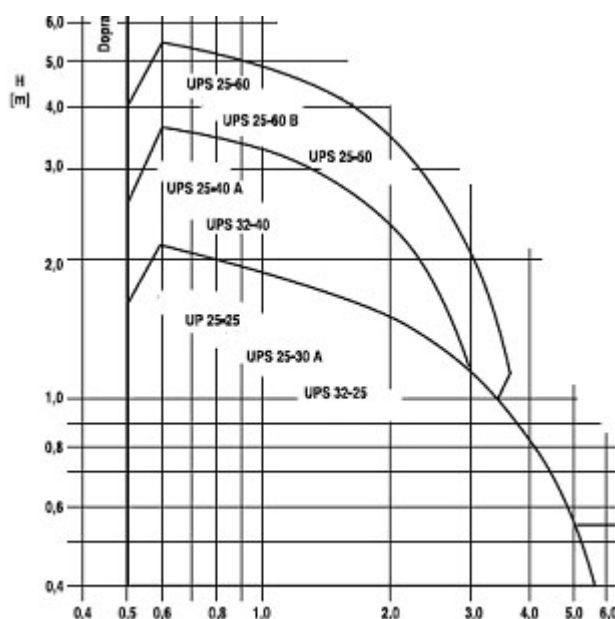
Použití: cirkulace horké ,nebo studené vody v chladicích a klimatizačních systémech.

Napětí 230 V.

Informace na www.grundfos.com.



Obr.21. Čerpadlo firma Grundfose



Obr.22. Karakteristika čerpadla

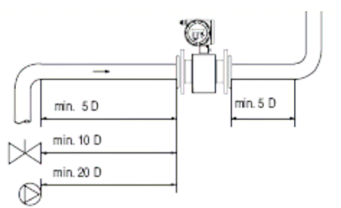
Závislost průtočného množství v m³/h a výtlačné výšce.

4.4 Indukční průtokoměr - Sitrans FM 711

Použití pro měření průtoku kapalin s elektrickou vodivostí. Neobsahují pohyblivé části, můžeme jimi měřit v libovolné poloze a obou směrech. Magneticko-indukční vysílač je vhodný pro měření průtoku téměř všech elektricky vodivých kapalin, ale také kalů a past. Teplota, tlak, viskozita a hustota nemají na měření vliv. Vhodnou volbou výstelky lze zařízení použít i pro agresivní média.

Napájení AC 230 V nebo UC 24 V. Výstup 1x analog, 2x digital.

Pracuje se stejnosměrným polem se používá pro střední rychlosti (0,25 až 12 m/s) a vodivost od 3 μS . Volil jsem průtokoměr **DN 15**, průtok od 0,2 až 7 m³, při rychlosti 5,23 m/s průtok 2,5 m³. Průtoky jsou určeny podle grafu na www.siemens.cz.

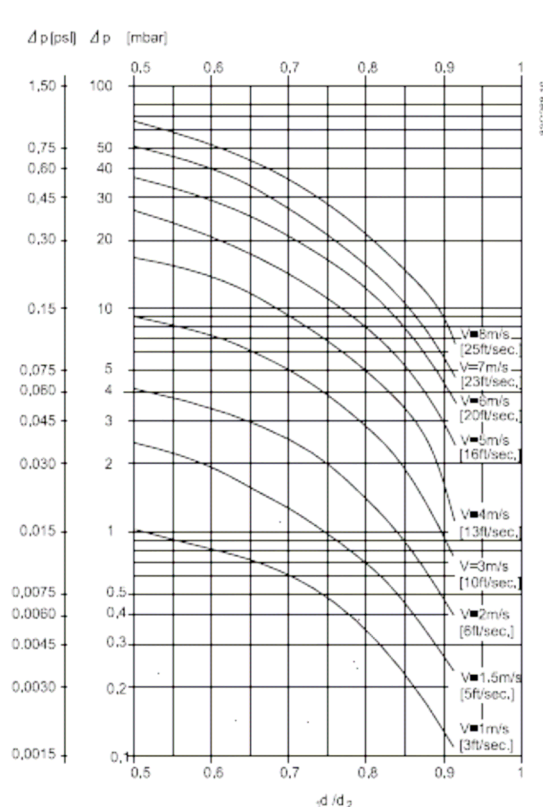


Obr.23. Délky před a za průtokoměrem

Před průtokoměrem musí být rovné potrubí ve vzdálenosti znázorněném na obrázku. Sonda se dodávají s DN od 2 do 2000. Výstupní signál 4 - 20 mA, přesnost 0,5% , zobrazení na 2 řádkovém LCD displeji. Viskozita média > 3 $\mu\text{S}/\text{cm}$.



Obr.24. Indukční průtokoměry



Obr.25. Charakteristika úbytku tlaku

Z charakteristiky vyplývá, že úbytek tlaku je 0,9 kPa při rychlosti 5,23 m/s.

4.5 Coriolisův průtokoměr - Sitrans FC Massflo Mass 2100

Massflo Mass 2100 DI 3 - D40 přesnost 0,1 %. Tyto průtokoměry jmenovitých světlostí až DN 150 měří s nejvyšší přesností na trhu (0,1 % z měřené hodnoty) přímo hmotnostní průtok nejen kapalin, ale i plynů v kilogramech, nebo v kilogramech na hodinu (aktuální průtok), popř. v jakýchkoliv odvozených jednotkách.

Hmotnostní průtokoměr firma Sitrans je vyroben z nerez oceli. Vybrán typ **DN 15**, který má průtočné množství 0-4600 kg/hod, teplota média -50°C až 180°C.



Obr.26. Coriolisův průtokoměr

Výpočet pro tlakovou ztrátu:

Reynoldovo číslo

$$Re = \frac{4 \cdot m}{\pi \cdot d \cdot \nu \cdot \delta} \quad (14)$$

Je-li $Re \geq 2300$ pak

$$\Delta p = K \cdot \nu^{0,25} \cdot m^{1,75} \cdot \delta^{-0,75} \quad (15)$$

Je-li $Re \leq 2300$ pak

$$\Delta p = K \cdot l \cdot \nu \cdot m \quad (16)$$

 Δp tlaková ztráta (mbar)

d vnitřní průměr měřících trubic (m)

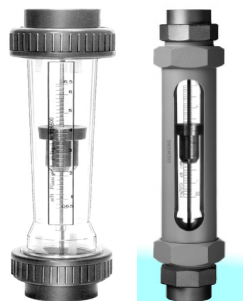
K konstanty závislé na jmenovité světlosti

 ν kinetická viskozita (m^2 / s)

m hmotnostní průtok (kg/s)

4.6 Plováчковý průtokoměr - rotametr Sitrans FVA

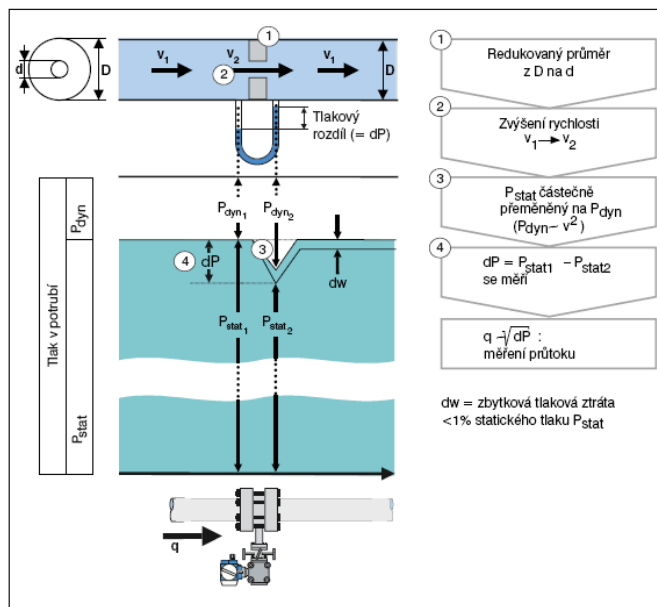
Rotametry SITRANS FVA se používají pro měření průtoku kapalin a plynů. Typy připojení jsou v rozsahu od G1/4" až G2". Maximální tlak 1000 kPa a teplota 150 °C. Jsou vybaveny explozní ochranou. Vybrán rotametr **Sitrans FVA Tubux –DN 25mm**, G1", nebo 3/4", Flow tube D 3000, Maximální průtok 3 m³/h, max tlak 1000 kPa, tlaková ztráta 3,3 kPa při průtoku 2,5 m³/h.



Obr.27. Rotametry Sitrans

4.7 Škrťací clony - Sitrans P DS

Clonu tvoří symetrické zúžení potrubí (průměr d), podle Bernoulliho tam dojde ke zvýšení rychlosti média. Malá část statického tlaku p_{stat} se přemění na dynamický p_{dyn} . Tento úbytek se měří pomocí Deltabar. Diferenciální tlak je úměrný průtoku.



Obr.28. Princip změny tlaku

Za clonou se až 80% statického poklesu tlaku d_p opět změnil zpět na statický tlak. Jen malá část podle zúžení $\beta = \frac{d}{D}$ je zbytková tlaková ztráta d_w na obr. Obvykle je d_w menší než 1% statického tlaku p statického v potrubí.

Jmenovité průměry DN 10 až DN 1000, pracovní tlaky PN 2 až PN 250, pracovní teploty -200 °C až +500 °C, přesnost: 0,10% až 0,15%, časový drift 0,1% za rok.



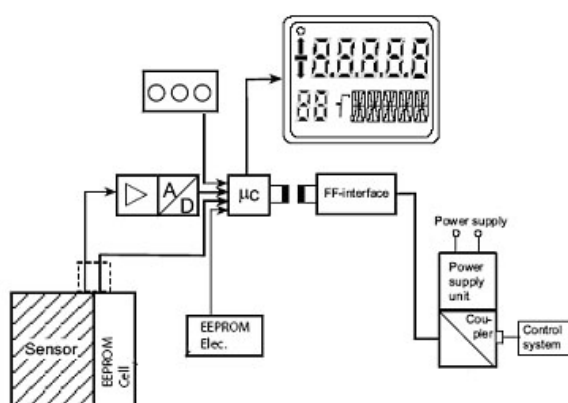
Obr.29. Škrťací clony

4.8 Diference tlaku - Sitrans P DS 3 PA

Použití pro měření diferenciálního tlaku. Měřicí rozsah od 0,2 kPa do 25 kPa. Pro měření diferenciálního tlaku - diferenciální tlak je úměrný průtoku. Připojíme ke každému průtokoměru v modelu.

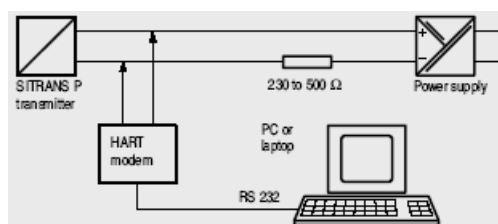


Obr.30. Měření diferenčního tlaku



Obr.31. Princip převodníku

sensor tlaku, zesilovač, analog/digital převodník, mikroprocesor, rozhraní, paměti, napájení, displej, zdroj napětí



Obr.32. Propojení s PC

5 NÁVRH A PROJEKT ÚLOHY PRO ZAŘÍZENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

5.1 Výpočty k návrhu úlohy

Průtok je množství tekutiny proteklé průřezem za jednotku času. $Q_v = \frac{V}{t}$

Objemový průtok:

$$Q_v = S \cdot v \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (17)$$

Hustota vody při 20°C $\delta = 998 \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$

Kinematická viskozita vody při 20°C

$$\nu = \frac{\eta}{\delta} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad 0.0000010 \text{ m}^2/\text{s} \quad (18)$$

Potrubí 1" průměr 26 mm

$$S = \pi \cdot r^2 \quad S_1 = 0,000530 \text{ m}^2 \quad (19)$$

průměr 13 mm

$$S = \pi \cdot r^2 \quad S_2 = 0,000132 \text{ m}^2 \quad (20)$$

5.1.1 Předpoklad

Čerpadlo

Při objemovém průtoku 2,5 m³/h tj. 0,69 l/s vyvine tlak 350 kPa, průměr výtlačného hrdla čerpadla je 25 mm, rychlost kapaliny 1,4 m/s.

Ventil Belimo

Při plně otevřeném ventilu a průtoku 0,69 l/s tlaková ztráta 6 kPa viz. charakteristika diferenčního tlaku ventilu obr. 22.

Potrubí

Pro výpočet tlakové ztráty v potrubí jsem použil program pro tlakové ztráty v potrubí na www.tzb-info.cz.

- potrubí 25 mm

při rychlosti 1,4 m/s, průtokem 2,5 m³/h, drsnost 0,02, délka 1 m, teplota 20°C, hustota 997,5, kinetická viskozita 0,000001 a tlaková ztráta třením 1 KPa .

- potrubí 13 mm

při rychlosti 5,23 m/s, průtokem 2,5 m³/h, drsnost 0,02, délka 1 m, teplota 20°C, hustota 997,5, kinetická viskozita 0,000001 a tlaková ztráta třením je 25,8 KPa.

Rychlost kapaliny v potrubí se mění v závislosti na průřezu potrubí.

Ideální kapalina je nestlačitelná, proto se na žádném místě nemůže hromadit, proto je objemový průtok v každém průřezu stejný. Platí $Q_v = \text{konst.}$, což je *rovnice spojitosti toku*

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (21)$$

$$v_2 = 5,23 \text{ m/s}$$

Škrťací clona - Sitrans P DS

DN 25, přesnost: 0,10%; 015% pro zaplnění ,časový drift 0,1% za rok ,úbytek statického tlaku max.1%, při statickém tlaku 350 kPa úbytek tlaku 3,5 kPa viz obr.32. Vnitřní průměr clony je d=10 mm, při průtoku 2,5 m³/h, rychlost 8,9 m/s.

Indukční průtokoměr - Sitrans FM

Průtočné množství 0,2 až 7 m³, rychlost proudící kapaliny 0,25 až 12 m/s , při rychlosti 5,23 m/s průtok asi 2,5 m³ viz charakteristika průtoku tlaková ztráta 0,9 kPa.

Coriolisův průtokoměr - Massflo Mass 2100 DI 3 - D40 přesnost 0,1%

Vybrán typ **DN 15**, závit ½“, který má průtočné množství 0-4600 kg/hod, teplota média -50°C až 180°C. Tlaková ztráta 64,6 Kpa při průtoku 2,5 m³/h.

Rotametr Sitrans FVA

Sitrans FVA Tubux –DN 25mm, G1“,nebo ¾“, Flow tube D 3000.

Maximální průtok 3 m³/h, max tlak 1000 kPa, tlaková ztráta 3,3 kPa viz tabulky výrobce.

Diference tlaku - Sitrans P DS 3 PA

Připojíme pro měření difference tlaku u každého průtokoměru, abychom mohli sledovat změnu difference tlaku při změně průtoku (změně rychlosti měřené kapaliny).

Rozsah měření 0,25 až 25 kPa.



Obr.33. Schéma zapojení průtokoměrů

5.1.2 Úbytky tlaku

1 bar = 100 kPa

Čerpadlo - rychlost kapalina na výtláčném hrdle 1,4 m/s při tlaku 3,5 bar ,tj. 350 kPa.

Ventil Belimo se spojitým ovládáním při max. průřezu průtok 6,3 m³/h, úbytek tlaku 6,2 kPa.

Clona - na redukovaném průměru se zvýší rychlost, tlak statický se částečně změní na tlak dynamický, před a za clonou jsou různé statické tlaky (diference tlaků), který se počítá max.1%.

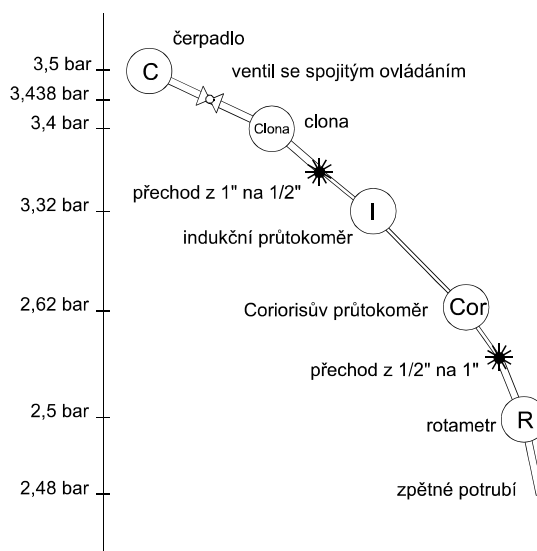
Přechod potrubí z 1“ na ½“, změna rychlosti z 1,4 m/s na 5,23 m/s. Ztráty tlaku způsobené třením

v potrubí jsou vyjádřeny v předchozí kapitole a Tab.I.

Indukční a Coriolisův průtokoměr - tlakové ztráty vyjádřeny v diagramu.

Přechod potrubí z ½“ na 1“.

Rotametr a zpětné potrubí. Zpět do nádoby půjde kapalina z výtláčného potrubí pod tlakem 248 kPa.

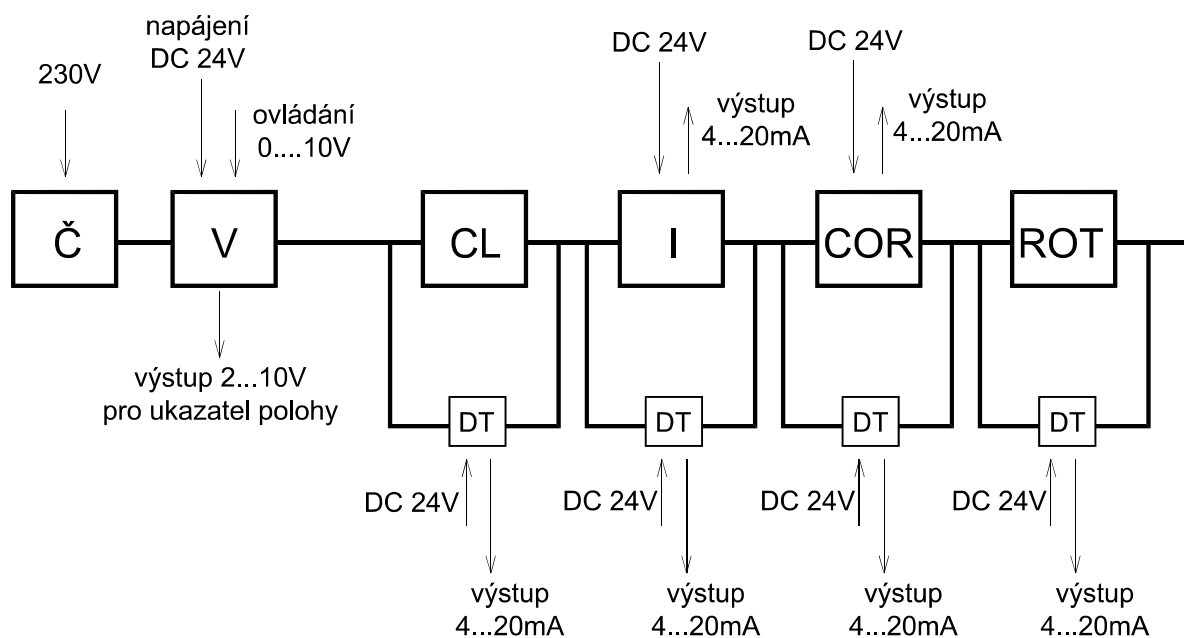


Obr.34.Úbytky tlaku

Tab. I.: Tabulka závislosti tlaku a průtoku na použitých přístrojích

čerpadlo	Max. průtok $5 \text{ m}^3/\text{h}$ při 80 kPa , max. tlak 540 kPa při $0,6 \text{ m}^3$, při průtoku $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ rychlost $1,4 \text{ m/s}$
Ventil Belimo DN 20	Max. průtok $6,3 \text{ m}^3/\text{h}$, tlaková ztráta při průtoku $2,5 \text{ m}^3$, 6 kPa
Indukční průtokoměr FM	DN15, průtok $0,2\text{-}7 \text{ m}^3/\text{h}$, při rychlosti $5,23 \text{ m/s}$ průtok $2,5 \text{ m}^3$, tlaková ztráta $0,9 \text{ kPa}$.
Coriolisův průtokoměr FC	DN15, průtočné množství $0\text{-}4600 \text{ kg/h}$, tlaková ztráta $64,6 \text{ kPa}$ při průtoku $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$.
Clona PDS	DN25, tlaková ztráta při průtoku $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, rychlost kapaliny $8,9 \text{ m/s}$, tlaková ztráta $3,5 \text{ kPa}$
Plováčkový průtokoměr FVA	DN25, max. průtok $3 \text{ m}^3/\text{h}$, tlaková ztráta při průtoku $2,5 \text{ m}^3$, $3,3 \text{ kPa}$.
Diference tlaku PDS 3 PA	Měření difference tlaku od $0,2 \text{ kPa}$ do 25 kPa .
Ztráty v potrubí $\frac{1}{2}$ "	Při rychlosti $5,23 \text{ m/s}$ průtok $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, tlaková ztráta $25,8 \text{ kPa}$ na 1 m potrubí.
Ztráty v potrubí 1 "	Při rychlosti $1,4 \text{ m/s}$ průtok $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, tlaková ztráta 1 kPa na 1 m potrubí.

5.2 Schéma vstupů a výstupů jednotlivých částí sestavy



Obr.35.Schéma vstupů a výstupů

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo obecné seznámení s měřením průtoku kapalin ve světě, způsoby měření, porovnání průtokoměrů podle druhu měřené tekutiny, rozsahu teploty média, rozsahu měření a ukázat některé aplikace použití v průmyslu – byly použity převážně průmyslové aplikace firem Endres-Hauser, Siemens.

Dále se tato práce zabývá výběrem průtokoměrů pro laboratorní a výukové účely (zpracování úvodního projektu zařízení pro výuku měření průtoku). Účelem bylo vybrat a skloubit dohromady průtokoměry s podobnými pracovními rozsahy, které měly být zapojeny za sebou (sériově). Průtokoměry měly být vybrány od firmy Siemens.

Průtokoměry byly vybírány podle pracovního rozsahu při měření průtoku, pracovního tlaku, ve kterém jsou schopny pracovat a rychlostí měřené kapaliny. Pro skloubení měřicích rozsahů těchto průtokoměrů musely být měněny světlosti potrubí, aby byla změněna rychlost měřené kapaliny. Každý průtokoměr je schopen měřit určité průtočné množství s různou rychlostí měřené kapaliny.

V zadání bylo uvedeno použít čerpadlo se spojitým ovládáním otáček Protože pro průtoky, použité v této práci, čerpadlo se spojitým ovládáním otáček není k dispozici, použili jsme čerpadlo od firmy Grundfos UP 25-60. Řešením by bylo použití frekvenčního měniče otáček, ale tyto měniče se vyrábějí pro větší výkony. Proto byla zvolena varianta řízení průtoku ventilem se spojitým ovládáním. Byl vybrán zdvihový ventil firmy Belimo DN 20 a pohon pro zdvihový ventil NV24-MTF.

Seznam vybraných průtokoměrů:

- Clonový průtokoměr (škrťací clona Sitrans P DS se jmenovitou světlostí DN 25) – pro měření rychlostní metodou
- Sitrans PDS 3PA (programovatelný) – pro měření difference tlaku (měření u každého použitého průtokoměru)
- Coriolisův průtokoměr Sitrans FC se jmenovitou světlostí DN 15 (nejpřesnější průtokoměr na trhu) – pro měření hmotnostního průtoku. Před tímto průtokoměrem byla provedena redukce potrubí z 25 na 13 mm, abychom mohli zajistit přibližně stejné pracovní rozsahy těchto průtokoměrů
- Magnetickoindukční průtokoměr Sitrans FM 711 se jmenovitou světlostí DN 15 - vhodný pro měření průtoku téměř všech vodivých kapalin

- Plováчковý průtokoměr – Rotametr FVA

Na závěr této diplomové práce bylo zhotoveno schéma zapojení, podle něhož bude sestavena daný model, který bude porovnávat přesnosti měření jednotlivých typů průtokoměrů při různých průtočných množstvích a různých tlacích.

Toto nebylo z důvodu nedostatku přístrojové základny provedeno a bude provedeno dodatečně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Monografické publikace:

- 1) HRUŠKA, F.: Technické prostředky automatizace VI. Snímače, převodníky, regulátory, průmyslová výpočetní technika, ovládací jednotky. UTB ve Zlíně, FT, září 2004, 107 s., ISBN 80-7318-026-X.
- 2) Firemní literatura firmy SIEMENS
- 3) Firemní literatura firmy KROHNER

Článek v časopise

Odborný časopis pro automatizační techniku -automatizace č 12/2003, 2/2002.

WWW stránka

Firemní stránky pro průtokoměry: www.siemens.cz

www.omegaeng.cz

www.endress.cz

www.datacon.cz

www.krohne-mar.com

www.elektrorevue.cz,

Firemní stránky čerpadel: www.grundfos.cz, www.willo.cz,

Ventily se spojitým ovládáním: www.belimo.cz

Výpočet tlakové ztráty v potrubí: www.tzb-info.cz

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1. Bubnové čidlo.....	11
Obr.2. Plováčkové čidlo.....	14
Obr.3. Základní tvary plováků.....	14
Obr.4. Lopatkový snímač.....	15
Obr.5. Turbínkový průtokoměr.....	16
Obr.6. Princip měření průtoku pomocí clony.....	16
Obr.7. Normalizovaná clona s komorovým odběrem tlaků.....	17
Obr.8. Druhy clon.....	17
Obr.9. Druhy clon.....	17
Obr.10. Příklad dýzy.....	18
Obr.11. Princip Venturiho dýzy.....	18
Obr.12. Venturiho trubice.....	18
Obr.13. Princip indukčního snímače.....	19
Obr.14. Indukční průtokoměr.....	20
Obr.15. Ultrazvukový snímač.....	21
Obr.16. Princip Coriolisova převodníku.....	24
Obr.17. Regulační dvoucestný ventil:.....	31
Obr.18. Charakteristika ventilu.....	32
Obr.19. Zdvihový pohon.....	32
Obr.20. Schéma připojení.....	32
Obr.21. Čerpadlo firma Grundfose.....	33
Obr.22. Charakteristika čerpadla.....	33
Obr.23. Délky před a za průtokoměrem.....	34
Obr.24. Indukční průtokoměry.....	34
Obr.25. Charakteristika úbytku tlaku.....	35
Obr.26. Coriolisův průtokoměr.....	35
Obr.27. Rotametry Sitrans.....	36
Obr.28. Princip změny tlaku.....	37
Obr.29. Škrtící clony.....	37
Obr.30. Měření diferenčního tlaku.....	38
Obr.31. Princip převodníku.....	38
Obr.32. Propojení s PC.....	38
Obr.33. Schéma zapojení průtokoměrů.....	41
Obr.34. Úbytky tlaku.....	42
Obr.35. Schéma vstupů a výstupů.....	43

SEZNAM TABULEK

Tab. I.: Tabulka závislosti tlaku a průtoku na použitých přístrojích	42
--	----