

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI  
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA  
SPOLEČNÁ LABORATOŘ OPTIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření a regulace průtoku vody v chladicím  
okruhu měřicí cely



Vypracoval:	<b>Lukáš Dokoupil</b>
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	1701R030 Přístrojová fyzika
Forma studia:	Prezenční
Vedoucí diplomové práce:	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph. D.
Termín odevzdání práce:	srpen 2014

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením RNDr. Jiřího Pechouška, Ph.D. a že jsem použil zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých pramenů.

V Olomouci dne 4. srpna 2014

.....  
Lukáš Dokoupil

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu RNDr. Jiřímu Pechouškovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc a rady při zpracování této bakalářské práce.

# Bibliografická identifikace

Jméno a příjmení autora	Lukáš Dokoupil
Název práce	Měření a regulace průtoku vody v chladicím okruhu měřicí cely
Typ práce	Bakalářská
Pracoviště	Společná laboratoř optiky
Vedoucí práce	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph. D.
Rok obhajoby práce	2014
Abstrakt	Účelem této bakalářské práce je zjistit, jestli lze sestavit vodní chladicí okruh regulující průtok vody s ohledem na ekonomické aspekty spotřeby elektrické energie čerpadlem. Tento chladicí okruh má sloužit jako ochrana před teplem unikajícím z měřicí cely Mössbauerova spektrometru. Z toho důvodu bude proveden experiment, ve kterém se bude měřit závislost teploty povrchu chladicího bloku, sloužícího jako tepelné stínění měřicí cely, na objemovém průtoku vody, která proudí kanálky chladicího bloku. První kapitola práce podrobněji rozebírá obecné metody měření průtoku a srovnává jejich možnosti. Druhá kapitola se pak zabývá návrhem experimentální sestavy chladicího okruhu, technickými prostředky k jeho realizaci a vývojem softwaru pro sběr dat z experimentu. Zbytek práce je věnován výsledkům experimentu a kritické diskuzi možných zlepšení v dalších experimentech vedoucích k sestavení funkčního prototypu měřicí cely s chladicím okruhem.
Klíčová slova	chladicí okruh, chlazení, měřicí cely, měření průtoku, měření teploty, Mössbauerův spektrometr, průtokové chlazení
Počet stran	78
Počet příloh	3
Jazyk	český

# Bibliographical identification

Autor's first name and surname	Lukáš Dokoupil
Title	Measurement and control processes in water cooling system of the measurement cell
Type of thesis	Bachelor
Department	Joint Laboratory of Optics
Supervisor	RNDr. Jiří Pechoušek, Ph. D.
The year of presentation	2014
Abstract	<p>The purpose of this bachelor's thesis is to learn, whether it is possible to construct water cooling system controlling water flow with respect to economical aspects of pump's electrical energy consumption. The cooling system will serve as a shelter from heat leaking from measurement cell of Mössbauer spectrometer. Therefore the experiment will be conducted to acknowledge the relation between the surface temperature of a cooling block - a thermal shielding of the measurement cell and volumetric flow rate in the circuit of the cooling system. First chapter deals with a comparison of common flow rate measurement methods. Second chapter then is concentrated on the development of experimental implementation of cooling system, instruments to be used and DAQ software development. The rest of the thesis is dedicated to results of the experiment and critical discussion of possible improvements for conduction of subsequent experiments leading to a construction of an operational prototype of measurement cell with cooling system.</p>
Keywords	convection cooling, cooling system, cooling, flow rate measurement, measurement cell, Mössbauer spectrometer, temperature measurement
Number of pages	78
Number of appendices	3
Language	czech

# Obsah

Úvod	8
<b>1 Měření průtoku</b>	<b>9</b>
1.1 Vlastnosti průtokoměrů . . . . .	9
1.1.1 Dělení průtokoměrů . . . . .	9
1.1.2 Základy mechaniky tekutin . . . . .	10
1.1.3 Výběr vhodného průtokoměru . . . . .	14
1.2 Objemové průtokoměry . . . . .	17
1.2.1 Oválný průtokoměr . . . . .	17
1.3 Průtokoměry s měřením rozdílů tlaku . . . . .	18
1.3.1 Rychlostní sondy . . . . .	19
1.3.2 Průřezové průtokoměry se škrťacími členy . . . . .	21
1.4 Rotametry . . . . .	25
1.5 Turbínové průtokoměry . . . . .	27
1.6 Vírové průtokoměry . . . . .	28
1.7 Elektromagnetické průtokoměry . . . . .	29
1.8 Ultrazvukové průtokoměry . . . . .	30
1.8.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry . . . . .	31
1.8.2 Dopplerovské průtokoměry . . . . .	31
1.9 Coriolisovy průtokoměry . . . . .	32
1.10 Tepelné průtokoměry . . . . .	35
<b>2 Návrh a realizace experimentu</b>	<b>37</b>
2.1 Chladicí okruh a jeho součásti . . . . .	38
2.2 Užitá přístrojová technika . . . . .	40
2.2.1 OMEGA turbínové průtokoměry FLR1000ST . . . . .	40
2.2.2 Napájecí zdroj Diametral P230R51D . . . . .	41
2.2.3 Termočlánky . . . . .	42
2.2.4 Čerpadlo Masterflex L/S . . . . .	43
2.2.5 Magnetická míchačka Heidolph MR Hei-Tec . . . . .	44
2.3 Sběr a zpracování naměřených dat . . . . .	45
2.3.1 Měřicí karta NI USB-6008 . . . . .	45
2.3.2 Měřicí převodník NI USB-TC01 . . . . .	46
2.3.3 Měřicí aplikace v LabVIEW . . . . .	47
2.4 Experimentální sestava . . . . .	53
<b>3 Shrnutí výsledků měření</b>	<b>56</b>
<b>Závěr</b>	<b>62</b>

<b>Seznam použité literatury</b>	<b>63</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>68</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>69</b>
<b>Seznam použitých symbolů a zkratk</b>	<b>70</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>72</b>
Příloha 1: Tabulky výsledků jednotlivých měření . . . . .	72
Příloha 2: Grafy jednotlivých měření . . . . .	75
Příloha 3: Obsah přiloženého CD . . . . .	78

# Úvod

V oblasti analýzy materiálů Mössbauerovou spektroskopií se provádí zahřátí vzorku zkoumaného materiálu na vysoké teploty nad 500 °C. Je však zřejmé, že teplo, které tato tělesa budou generovat, neohřívá pouze analyzovaný vzorek, ale také okolní prostředí. Vzniká tak riziko, že toto teplo, které se šíří dále do prostoru, zahřeje rovněž citlivou aparaturu Mössbauerova spektrometru. Nabízí se tedy otázka, jak tomuto problému zabránit. Ukazuje se, že jedním z možných řešení by bylo vybudovat specializovanou měřicí cely, která na vstupu a výstupu obsahuje kovové víko s kanálky, kterými bude proudit chladicí kapalina odvádějící teplo z této cely, tak aby nedošlo ke zvýšení teploty v okolí nad maximální provozní teplotu, při které ještě nedochází k významné změně charakteristik či přímo nevratnému poškození měřicích přístrojů nacházejících se v blízkosti měřicí cely.



# Kapitola 1

## Měření průtoku

Průtok tekutin měříme pomocí přístroje, který se nazývá průtokoměr. Citlivá část průtokoměru – snímač průtoku, slouží k převodu měřené veličiny – průtoku, na veličinu měronosnou, tj. veličinu, jejíž hodnota je závislá na rychlosti proudění nebo kinetické energii tekutiny. Pokud je tato veličina neelektrická, pak pro snadnější zpracování dat obsahuje průtokoměr ještě dodatečný snímač, který převádí neelektrickou veličinu na elektrickou.

### 1.1 Vlastnosti průtokoměrů

#### 1.1.1 Dělení průtokoměrů

Existují tři základní skupiny průtokoměrů, podle kterých lze kategorizovat fyzikální metody na jejichž základě fungují snímače průtoku [1, 2]:

- *objemové průtokoměry* měří objemový průtok  $Q_V$  na základě stálého odměřování objemu  $V$  za čas  $t$  dle definice

$$Q_V = \frac{V}{t}; \quad (1.1)$$

- *rychlostní průtokoměry* (rychlostní sondy, škrťací členy, rotametry, turbínové, vírové, značkovací, ultrazvukové, elektromagnetické) měří objemový průtok  $Q_V$  na základě zjištění střední rychlosti proudění  $v$  a obsahu  $S$  průřezu potrubí

$$Q_V = Sv; \quad (1.2)$$

- *hmotnostní průtokoměry* (Coriolisovy, tepelné) měří hmotnostní průtok  $Q_m$  na základě měření hmotnosti tekutiny  $m$  proteklé za čas  $t$ . Měronosná veličina je

úměrná hmotnostnímu průtoku  $Q_m$ , který je definován

$$Q_m = \frac{m}{t}. \quad (1.3)$$

Mezi hmotnostním a objemovým průtokem platí vztah

$$Q_m = \frac{m}{t} = \frac{\rho V}{t} = \rho Q_V. \quad (1.4)$$

Dělit průtokoměry můžeme také podle toho zda je energie z tekutiny odebírána či je do ní přidávána. V prvním případě označujeme takové průtokoměry jako *pasivní*. To jsou například takové průtokoměry, které obsahují část, která je vlivem průtoku tekutiny uvedena do pohybu. Takový průtokoměr ale může ovlivnit charakter proudění a tedy rychlostní profil. Rovněž vykazují vyšší tlakový spád a pro jejich bezproblémové fungování je nutné před i za ně připojit dostatečně dlouhé a rovné úseky potrubí. Mezi *aktivní* průtokoměry, tedy ty, co přidávají energii do tekutiny řadíme například ultrazvukové, indukční nebo tepelné. Díky své povaze neovlivňují znatelnou mírou vlastnosti protékané kapaliny a dovolují i bezdotyková měření [3].

### 1.1.2 Základy mechaniky tekutin

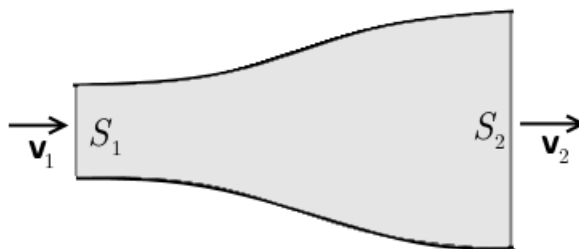
Pohyb tekutiny v daném prostoru se řídí zákony mechaniky tekutin. Odvození jejich matematické formulace pro obecné případy může být velmi složité. V zájmu zachování stručnosti textu si proto uvedeme tyto zákony pouze pro nejjednodušší případy.

**Rovnice kontinuity** Pro tekutinu proudící v libovolném vymezeném úseku potrubí platí zákon zachování hmotnosti. Hmotnost tekutiny, která v daném časovém okamžiku přiteče rychlostí  $v_1$  do úseku průřezem o obsahu  $S_1$  je rovna hmotnosti, která z něj vyteče průřezem o obsahu  $S_2$  rychlostí  $v_2$  za předpokladu, že mezi těmito místy nedochází k hromadění tekutiny a není zde boční přítok ani odtok tak, jak to ilustruje obr. 1.1.

Potom hmotnostní průtok  $Q_m$  je po celé délce potrubí konstantní a platí, že

$$Q_m = \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 = \text{konst.}, \quad (1.5)$$

kde  $\rho_1$  a  $\rho_2$  jsou hodnoty hustoty tekutiny v daných průřezech potrubí. Rovnice (1.5) se nazývá *rovnice kontinuity*. Jestliže je tekutina nestlačitelná pak platí, že hustota je po celé délce potrubí konstantní, potom platí i  $\rho_1 = \rho_2$  a hustotu můžeme z obou stran



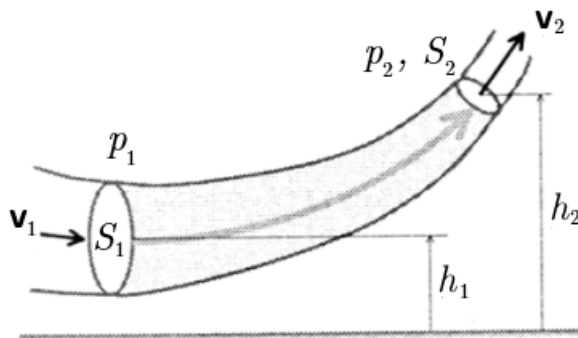
Obr. 1.1: Rovnice kontinuity

rovnice vykrátit. Rovnice kontinuity dostává tvar

$$Q_V = S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{konst.} \quad (1.6)$$

Pro nestlačitelnou tekutinu platí zákon zachování objemu, neboť objem tekutiny, který v daném okamžiku přiteče do potrubí otvorem 1 se rovná objemu, který ve stejném okamžiku odeče otvorem 2 [1, 3].

**Bernoulliho rovnice** Bernoulliho rovnice formuluje zákon zachování energie ustáleného proudění tekutiny. Celá situace je znázorněna na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Bernoulliho rovnice [1] (upraveno)

Pro ideální nestlačitelnou tekutinu, proudící mezi dvěma body potrubí 1 a 2, platí vztah

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 + \rho g h_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 + \rho g h_2, \quad (1.7)$$

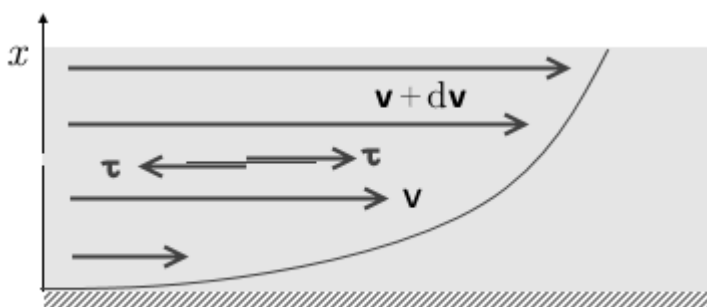
kde  $v$  je velikost rychlosti proudění tekutiny,  $p$  statický tlak,  $h$  výška, ve které se nachází tekutina a  $\rho$  je její hustota.

Vztah (1.7) se nazývá Bernoulliho rovnice v tlakovém tvaru. První člen v součtu zleva, ve kterém figuruje velikost rychlosti  $v$  se nazývá *dynamický tlak* a odpovídá objemové hustotě kinetické energie tekutiny. Druhý člen  $p$  je *statický tlak*, který souvisí s

tlakovou potenciální energií, kterou má tekutina vlivem působení tlakové síly na průřez o obsahu  $S$ . Třetí člen je *hydrostatický tlak* vznikající působením pole tíhové síly a je tedy závislý na výšce  $h$ , ve které se tekutina nachází. U reálné kapaliny je nutné na pravé straně rovnice (1.4) uvažovat *ztrátový tlak*  $p_z$  úměrný energii, která se mezi body 1 a 2 vlivem působení různých odporových sil přeměňuje na neúčinné teplo [3].

Z měření dynamického tlaku lze získat informaci o rychlosti proudění tekutiny  $v$ , čehož využívají průtokoměry se škrťacími orgány a rychlostní sondy [3].

**Viskozita** V reálných tekutinách dochází ke vzniku smykového napětí  $\tau$  mezi sousedními vrstvami tekutiny pohybující se různými rychlostmi, jak je znázorněno na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Viskozita

Pro tzv. *newtonské tekutiny* (voda, vzduch, benzín, většina plynů a čistých kapalin) je toto smykové napětí přímo úměrné velikosti změny rychlosti  $dv/dx$  ve směru osy  $x$  podle Newtonova zákona viskozity

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx}, \quad (1.8)$$

kde konstanta  $\eta$  je *dynamická viskozita* tekutiny. Jednotkou dynamické viskozity v SI je Pa·s (Pascal sekunda). V technické praxi se často užívá jednotka P (Poise), zejména pak její násobek cP (centipoise). Platí  $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ .

V některých případech, např. při odtékání kapaliny otvorem na dně vlivem tíhové síly, je vhodnější veličinou kinemická viskozita  $\nu$  pro kterou platí

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (1.9)$$

kde  $\rho$  je hustota tekutiny. Jednotkou SI kinemické viskozity je  $\text{m}^2\cdot\text{s}$ . Hojně používanou jednotkou je St (Stokes) a její násobek cSt (centistokes), pro který platí  $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2\cdot\text{s}$

S rostoucí teplotou hodnota viskozity u kapalin klesá, zatímco u plynů roste. U

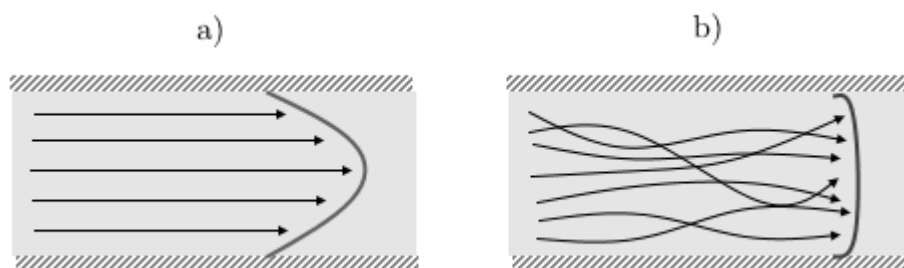
plynů je hodnota viskozity o několik řádů menší než u kapalných látek. Největších hodnot viskozity dosahují pryskyřice a skla. Srovnání hodnot dynamické viskozity různých látek nabízí tab. 1.1. [1, 3].

	$\eta$ [mPa·s]
olivový olej 20 °C [4]	84
kys. sírová 20 °C [5]	25,4
krev 37 °C [5]	3,0 - 3,6
ethanol 20 °C [5]	1,20
voda 20 °C [5]	1,00
benzín 20 °C [5]	0,53
vzduch 0 °C [5]	$14,1 \cdot 10^{-3}$
dusík 0 °C [5]	$17,07 \cdot 10^{-3}$
methan 0 °C [5]	$10,26 \cdot 10^{-3}$

Tab. 1.1: Dynamická viskozita různých tekutin

**Reynoldsovo číslo** Proudění reálné tekutiny dělíme na:

- *laminární* - na obr. 1.4a, při němž převažuje účinek třecích sil, dráhy částic se navzájem nekříží. Rychlostní profil příčného průřezu potrubí má parabolické rozdělení. Nejrychleji se pohybuje tekutina v ose potrubí, nejpomaleji pak u stěny, kde je účinek třecích sil největší,
- *turbulentní* - na obr. 1.4b, kde účinek setrvačných sil převažuje nad silami třecími. Dochází k chaotickému pohybu částic tekutiny, vlivem kterého se jejich dráhy navzájem kříží. Rychlostní profil má téměř ploché rozdělení.



Obr. 1.4: Proudění a) laminární, b) turbulentní

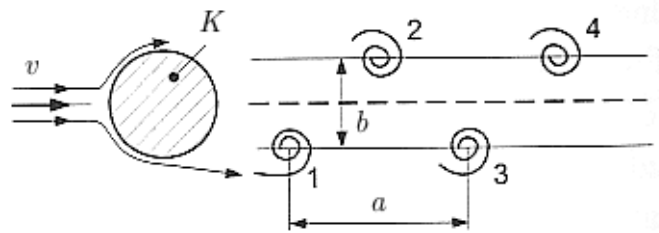
Pro posouzení charakteru proudění v potrubí se zavádí bezrozměrná veličina  $Re$  tzv. *Reynoldsovo číslo*

$$Re = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (1.10)$$

kde  $D$  je průměr potrubí,  $\rho$  je hustota,  $\eta$  dynamická viskozita a  $v$  rychlost proudění tekutiny. Pro laminární proudění jsou typické nízké rychlosti proudění oproti proudění turbulentnímu.

Pro potrubí různé geometrie lze najít tzv. *kritické Reynoldsovo číslo*  $Re_{krit}$ , při kterém je ještě proudění laminární. Nad touto hodnotou se se zvyšujícím Reynoldsovým číslem zvyšuje i pravděpodobnost, s jakou proudění přejde do turbulence. Pro potrubí kruhového průřezu bylo experimentálně zjištěno, že  $Re_{krit} = 2320$ . Ve skutečnosti při turbulentním proudění existuje u stěny potrubí *laminární podvrstva*. Její tloušťka se se zvyšujícím  $Re$  snižuje [3].

**Strouhalovo číslo** Při obtékání tělesa  $K$  s charakteristickým rozměrem  $b$  proudem tekutiny o velikosti rychlosti  $v$  vzniká dle obr. 1.5 za tělesem tzv. *Karmanova vírová stezka*. Víry se vytvářejí nad i pod tělesem pravidelně ve vzdálenosti  $a = v/f$ , kde  $f$  je frekvence tvorby vírů za tělesem.



Obr. 1.5: Karmanova vírová stezka [3] (upraveno)

Mezi frekvencí tvorby vírů  $f$  a rychlostí proudění  $v$  platí vztah

$$v = \frac{fb}{St} \quad (1.11)$$

kde  $St$  je bezrozměrné *Strouhalovo číslo*. Strouhalovo číslo je funkcí  $Re$ . Nicméně pro obtékaná tělesa různého tvaru jej lze považovat v určitém rozsahu  $Re$  za přibližně konstantní [3].

### 1.1.3 Výběr vhodného průtokoměru

Při pořizování průtokoměru je nutné postupovat racionálně a logicky, tak abychom dosáhli pro daný proces optimální kvality výstupních dat s nejmenšími celkovými náklady. Nestačí pouze znát výhody a nevýhody jednotlivých typů a jejich konstrukcí, ale je třeba důkladně znát systém, ve kterém chceme průtok měřit. Proto musíme umět odpovědět na několik základních otázek:

- *Jaký je účel měření?* - Jedná se o laboratorní nebo provozní měření? Chceme

pouze vědět jestli potrubím protéká tekutina nebo chceme vědět i hodnotu průtoku? Bude průtokoměr sloužit jako prostředek pro ekonomické zhodnocení proteklého množství nebo prvek v regulačním obvodu?

- *Jak často budeme měřit?* - U občasných měření klademe požadavek na snadnou a rychlou montáž. U trvalého měření nás zajímá především schopnost odolávat vnějším vlivům a spolehlivost.
- *Co budeme měřit?* - Pro výběr správného typu a konstrukce průtokoměru je nutné vědět zda měříme kapalinu, plyn nebo páru, jakou má viskozitu, hustotu a zdali obsahuje bubliny, pevné částice či jiné nehomogenity. Také nás zajímají chemické a fyzikální vlastnosti tekutiny, abychom věděli z jak odolného materiálu musí být vnitřek vyroben.
- *Kde budeme měřit?* - Jestliže se bude měřit v prostředí s omezeným přístupem, např. provoz s ionizujícím zářením nebo v prostředí se zvýšeným rizikem výbuchu. Provozní podmínky jako teplota a tlak jsou také důležitým faktorem při výběru průtokoměru.
- *Jak budeme naměřené údaje vyhodnocovat?* - Také musíme zvážit zda nás zajímá pouze okamžitá hodnota průtoku nebo chceme mít přehled o jeho průběhu v čase a zda chceme indikovat data přímo na místě nebo vzdáleně, např. přes internet.

Jakmile jsme schopni na tyto otázky odpovědět, tak můžeme zahájit vlastní výběr průtokoměru na základě požadovaných metrologických vlastností.

Mezi ty nejdůležitější patří *přesnost* a *opakovatelnost*. Přesnost vyjadřuje těsnost shody mezi hodnotou průtoku indikovanou výstupem průtokoměru s pravou hodnotou měřené veličiny. Opakovatelnost vyjadřuje, jak moc se hodnoty na výstupu průtokoměru liší mezi sebou navzájem za předpokladu neměnnosti vstupní veličiny a okolních podmínek, provádíme-li měření v krátkém časovém sledu. Přesnost průtokoměru závisí primárně na jeho principu a konstrukci, dále pak vlastnostech tekutiny jako jsou viskozita, hustota nebo vodivost. Přesnost i opakovatelnost se obvykle vyjadřuje v procentech z celého (FS – Full Scale) nebo kalibrovaného rozsahu (CS – Calibrated Span). Přesnost měření se také někdy vyjadřuje v procentech z měřené hodnoty (AR – Actual Reading). Z výše uvedených definic obou pojmů plyne, že opakovatelnost je nutnou podmínkou přesnosti, neboť u průtokoměru s výbornou opakovatelností lze odstup naměřených hodnot od pravé hodnoty korigovat pomocí dodatečné kalibrace, např. s využitím výpočetní techniky, zatímco u průtokoměrů se špatnou opakovatelností je tato práce vlivem vysokého rozptylu naměřených hodnot velmi obtížná. U přesných laboratorních měření, měření spotřeby vody, zemního plynu nebo v provozech, kde náklady podniku

závisí výrazně na schopnosti přesného dávkování surovin, požadujeme průtokoměry s vysokou přesností. V regulační technice si oproti tomu vystačíme obvykle s vysokou opakovatelností.

*Měřicí rozsah* stanovuje výrobce průtokoměru jako interval hodnot, které je schopen průtokoměr měřit s danou přesností a opakovatelností. Uvádí se jednak jako interval absolutních hodnot, ale také jako poměr mezi nejvyšší a nejnižší přípustnou hodnotou (TR - Turndown Ratio), který je charakteristický pro různé kategorie průtokoměrů. Překročením horní hranice stanoveného měřicího rozsahu průtokoměru může dojít k poškození některých jeho částí. Jak daleko od této hranice se lze vzdálit, aniž by k uvedeným problémům došlo, se udává v procentech maximální hodnoty rozsahu jako *přetížitelnost*. Je však nesmyslné pořizovat průtokoměry se schopností měřit průtoky mnohem vyšší než jaké bude vyžadovat naše aplikace, protože po překročení spodní hranice stanoveného rozsahu dochází ke zhoršení přesnosti a opakovatelnosti nebo průtokoměr přestane reagovat úplně.

*Dynamické vlastnosti* rozhodují o tom, jak rychle je schopen průtokoměr reagovat na změnu měřené veličiny. Jejich důležitost nabývá na významu zejména v regulačních obvodech, kde je pro bezpečnost a kvalitu procesu nutné sledovat okamžitou hodnotu měřeného průtoku.

*Spolehlivost* průtokoměru je doba, po kterou je zaručena bezchybná činnost průtokoměru. Závisí převážně na schopnosti jednotlivých součástí průtokoměru odolávat vlivům vedoucím k jejich opotřebení. Vysokou spolehlivost vyžadujeme tam, kde oprava nebo výměna poškozeného průtokoměru nepřipadá v úvahu. Týká se to nejen obtížně přístupných míst, ale i provozů, kde odstávka může způsobit nepřijatelný nárůst nákladů.

Mezi další kritéria, které nás zajímají při výběru průtokoměry jsou jednoduchost montáže, tvar a druh výstupního signálu a odolnost vůči rušivým vlivům, např. mechanickým otřesům nebo elektromagnetickým polím.

Jelikož se zdaleka nejedná o úkol triviální, nabízejí prodejci průtokoměrů návody, jak správný průtokoměr vybrat nebo dotazník, který umožňuje dodavateli vybrat správný průtokoměr pro daný účel [2, 3, 6].

Tab. 1.2 na konci kapitoly shrnuje metrologické vlastnosti průtokoměrů a jejich využití v praxi.



## 1.2 Objemové průtokoměry

Prímé měření proteklého objemu za čas je podstatou funkce objemových průtokoměrů a lze jej realizovat dvěma způsoby:

- *diskrétní* - při kterém se střídavě plní a vyprazdňují odměrné prostory a měří se počet plnicích a vyprazdňovacích cyklů za jednotku času;
- *spojité* - měří se čas, za který se nádoba zcela naplní tekutinou, poté se nádoba vyprázdní a provádí se nové měření.

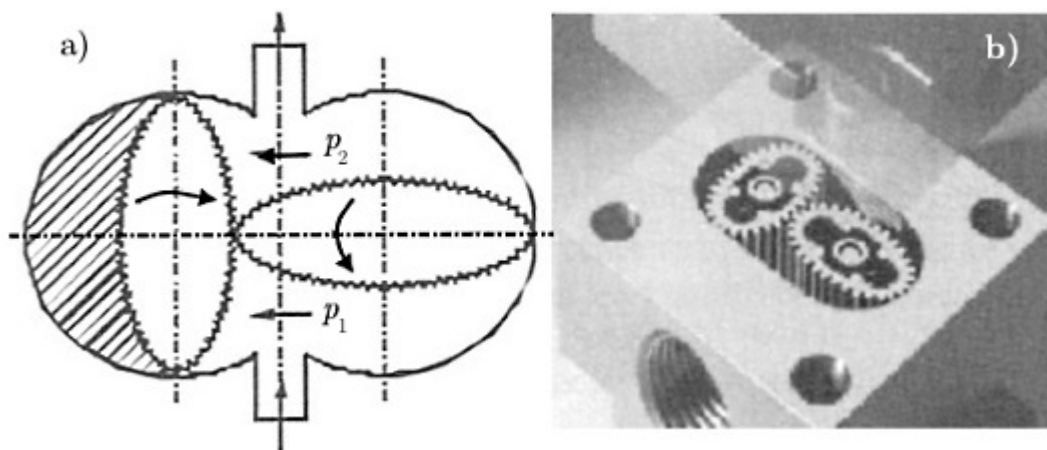
Měřidla se spojitou činností se používají pro velmi přesné kalibrační a ověřovací procedury v metrologických laboratořích. Čas je totiž veličinou, kterou jsme schopni se současným stavem techniky měřit s největší přesností. Pro průmyslová měření se častěji používají méně přesná měřidla s diskrétní činností. Pro bezproblémové měření průtoku kapalin je nutné zabránit vniku plynné fáze do kapaliny a teplotním a tlakovým podmínkám vedoucím k odpařování kapaliny. Za předpokladu dodržení správných podmínek měření patří objemové průtokoměry mezi nejpresnější měřidla průtoku. Vážením tekutiny lze navíc získat informaci o hmotnostním průtoku. Zde se nachází výčet nejčastěji užívaných konstrukcí objemových průtokoměrů:

- *oválový*;
- *tělesový*;
- *prstencový*.

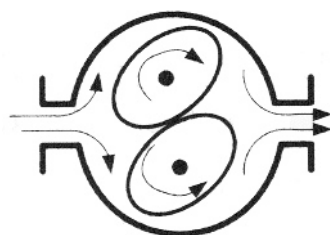
### 1.2.1 Oválový průtokoměr

Na obr. 1.6a se uvnitř komory průtokoměru se nachází dvě do sebe zapadající tělesa oválového tvaru s ozubenými okraji. Průtok tekutiny způsobuje rozdíl tlaků mezi horní a spodní částí komory, díky kterému se obě tělesa navzájem otáčejí. Snímá se počet otáček tělesa, který je úměrný objemovému průtoku.

Okraje oválných těles se vyrábějí převážně ozubené. Příklad konstrukce oválného průtokoměru s ozubenými koly je na obr. 1.6b. Zuby bývají často opatřené výřezy usnadňující průtok tekutin s vysokou hodnotou viskozity, které by jinak mohly ulpívat na zubech oválných těles. To se však projevuje snížením dosažitelné přesnosti měření. Problém usazování viskózních tekutin lze vyřešit rovněž použitím oválových průtokoměrů s hladkými okraji, jehož schéma je na obr. 1.7.



Obr. 1.6: Oválný průtokoměr: a) princip, b) konstrukce [3] (upraveno)



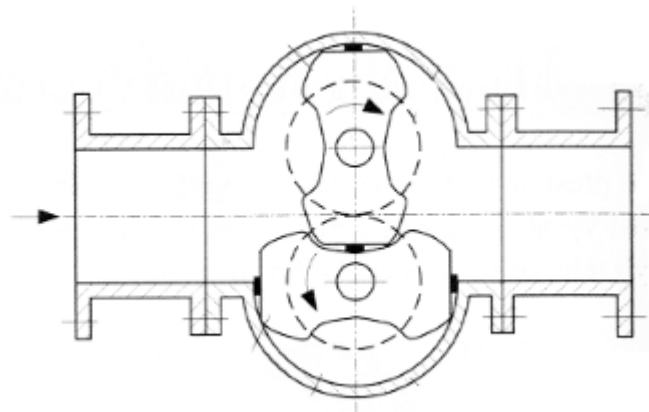
Obr. 1.7: Oválný průtokoměr s hladkými okraji [3]

S oválnými průtokoměry lze měřit průtoky od  $1 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  až po  $1\,000 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  při teplotách do  $290 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlacích až do  $2 \text{ MPa}$ . Maximální průtok, který lze měřit, je závislý na dovolené tlakové ztrátě na průtokoměru (obvykle až  $100 \text{ kPa}$ ). Nejistota měření pro tekutiny s dynamickou viskozitou vyšší než  $10 \text{ cP}$  může být až  $0,1 \%$  v oblasti nad  $20 \%$  z měřicího rozsahu. Pro tekutiny s nízkou hodnotou viskozity a malou rychlostí proudění může nejistota být ještě nižší (asi  $0,05 \%$ ) [3].

Levnější variantou oválného průtokoměru s nižší přesností je *tělesový průtokoměr*. Ozubená oválná tělesa jsou zde nahrazena tělesy ve tvaru dětských piškotů, jak je možno vidět na obr. 1.8. Lze s nimi měřit průtoky až  $2\,500 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  do tlaků  $15 \text{ MPa}$  a teploty  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nejistota měření je menší než  $1 \%$  v celém rozsahu. Velmi nízká je zejména u dostatečně vysokých hodnot průtoku. Naroste však o několik řádů až k  $1 \%$  u malých průtoků. Tlaková ztráta je menší než u oválných průtokoměru (v řádu desítek  $\text{kPa}$ ) [3].

### 1.3 Průtokoměry s měřením rozdílů tlaku

Při proudění tekutiny dochází vlivem různých překážek, které se mohou nacházet na dráze tekutiny, ke změně její kinetické energie, z čehož dle Bernoulliho rovnice (1.7)



Obr. 1.8: Tělesový (piškotový) průtokoměr [3]

plyne změna hodnoty dynamického a statického tlaku proudící tekutiny, přičemž celkový tlak se zachovává. Informaci o rychlosti proudění lze získat právě z dynamického tlaku a podle toho, jak hodnotu dynamického tlaku určujeme lze dělit průtokoměry s měřením rozdílu tlaků na dvě podskupiny:

- *rychlostní sondy* - kde dynamický tlak je vyjádřen jako rozdíl celkového a statického tlaku;
- *průřezové průtokoměry se škrťacími členy* - kde se dynamický tlak určuje jako rozdíl statických tlaků před překážkou zužující průřez potrubí a za ní.

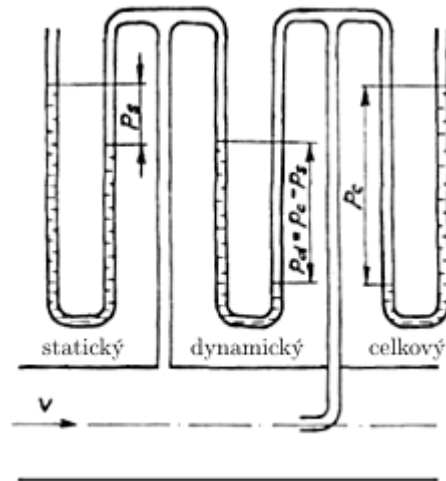
### 1.3.1 Rychlostní sondy

Rychlostní sondy určují rychlost proudění tekutiny z měření dynamického tlaku, který je dle Bernoulliho rovnice rozdílem celkového tlaku  $p_c$  a statického tlaku  $p_s$ . Pro rychlost proudění  $v$  platí

$$v = \sqrt{\frac{2(p_c - p_s)}{\rho}}. \quad (1.12)$$

**Pitotova trubice** Jde o nejstarší a nejjednodušší rychlostní sondu. V principiálním uspořádání na obr. 1.9 se měří dynamický tlak proudící tekutiny pomocí kapalinového diferenčního tlakoměru. Jedna část tlakoměru má trubici jejíž otvor je přivařen na horní stěnu potrubí tak, aby snímala statický tlak  $p_s$  v tekutině, zatímco druhá část snímá celkový tlak tekutiny  $p_c$ , neboť má trubici zavedenou dovnitř potrubí a zahnutou do pravého úhlu, proti směru proudu tak, že část proudu tekoucí napříč otvorem trubice se zastaví, což v souladu s Bernoulliho rovnicí znamená, že se zde veškerý dynamický tlak přemění na statický, díky čemuž je zde statický tlak roven celkovému tlaku tekutiny [2].

Zdrojem nejistot měření může být odchýlení osy snímače od kolmice ke směru



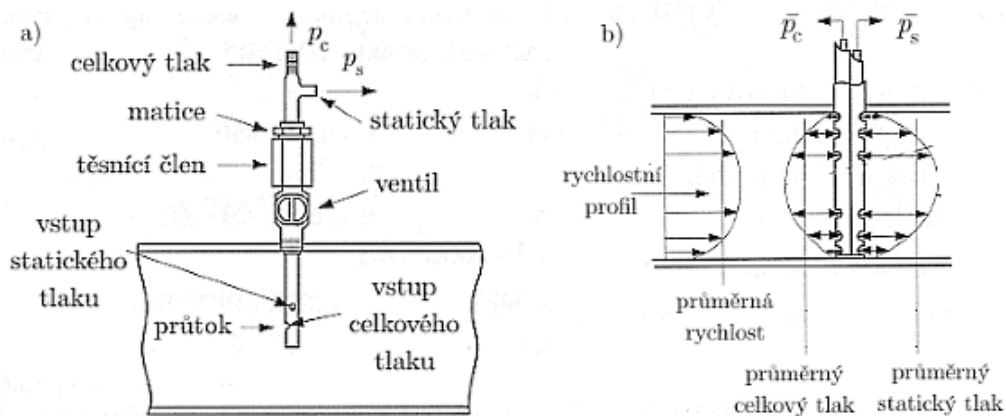
Obr. 1.9: Princip fungování Pitotovy trubice [2] (upraveno)

proudění, protože přitom dochází k působení dynamického tlaku na otvor, který má snímat pouze statický tlak tekutiny. Rovněž odchylení trubice snímající celkový tlak od směru rovnoběžného se směrem proudění snižuje do značné míry přesnost měření. Dalšími zdroji nejistot měření mohou být změny viskozity, stlačitelnost tekutiny a především usazeniny na otvorech trubic pro snímání tlakové difference, proto se Pitotovy trubice užívají pouze pro měření velmi čistých tekutin. Správnou kalibrací Pitotovy trubice lze snížit výslednou nejistotu měření pod 1 % v relativním rozsahu až 4:1 [3, 8].

Pitotovy trubice se doporučují používat pro proudění tekutin s  $Re > 20000$ . Jinak je nutné nastavit otvor pro měření celkového tlaku tak, aby jeho příčná poloha v potrubí odpovídala průměrné rychlosti. U vysoce turbulentního proudění se předpokládá, že jeho rychlostní profil je rovnoměrný a tedy rozptyl rychlostí od průměrné hodnoty je v příčném průřezu zanedbatelný [3]. Problém rychlostního Na obr. 1.10a je konstrukce Pitotovy trubice s dvojitou stěnou. Statický tlak  $p_s$  je snímán otvorem na straně trubice kolmým na průtok, celkový tlak  $p_c$  je snímán otvorem proti proudu tekutiny [3].

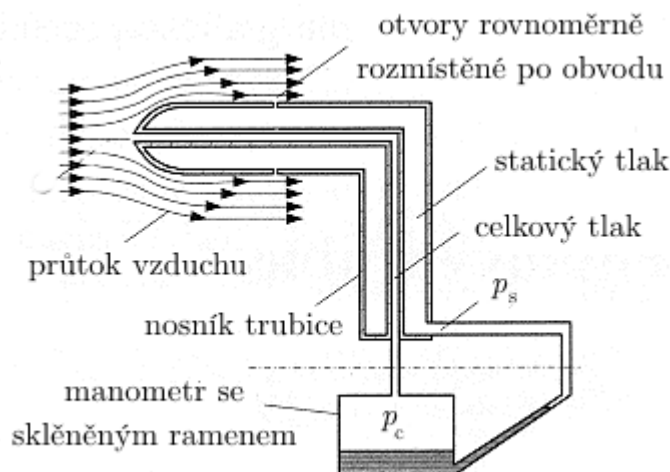
*Víceotvorová pitotova trubice* umožňuje důmyslně vyřešit problém se získáním přesné střední hodnoty rychlosti snímáním tvaru rychlostního profilu. Jak je vidět na obr. 1.10b, jedná se o trubku s několika otvory umístěnými napříč průřezem potrubí. Každý otvor na straně proti proudu snímá celkový tlak  $p_c$  odpovídající vzdálenosti otvoru od stěny potrubí, zatímco otvory na straně ve směru proudu snímají statický tlak  $p_s$ . Průměrováním celkového tlaku  $\bar{p}_c$  a statického tlaku  $\bar{p}_s$  lze získat střední hodnotu rychlosti  $\bar{v}$ , která je důležitá k určení správné hodnoty objemového průtoku  $Q_V$  [3].

**Prandtlova trubice** Otvory pro měření statického a celkové tlaku jsou u Prandtlovy trubice přibližně ve stejném místě, tak jak je to znázorněné na obr. 1.11. Statický tlak  $p_s$



Obr. 1.10: Pitotova trubice a) s dvojitou stěnou, b) víceotvorová [3] (upraveno)

je snímán otvory na boční stěně trubice ve vzdálenosti větší než trojnásobku průměru trubice od otvoru pro snímání celkového tlaku  $p_c$ . Pro správné měření je třeba zajistit, aby u otvoru pro měření statického tlaku byly minimální turbulence [3].

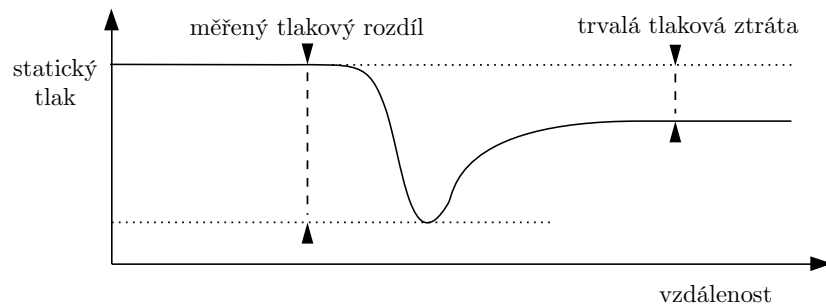


Obr. 1.11: Princip fungování Prandtlovy trubice [3] (upraveno)

### 1.3.2 Průřezové průtokoměry se škrťacími členy

Graf na obr. 1.12 ukazuje charakteristické rozdělení statického tlaku po celé délce jeho potrubí, které vytváří škrťací člen průřezového průtokoměru umístěný protékající kapalině do cesty. Rychlost proudění  $v$  je u průřezových průtokoměrů úměrná rozdílu tlaků  $\Delta p$  před škrťacím a za škrťacím členem podle této rovnice

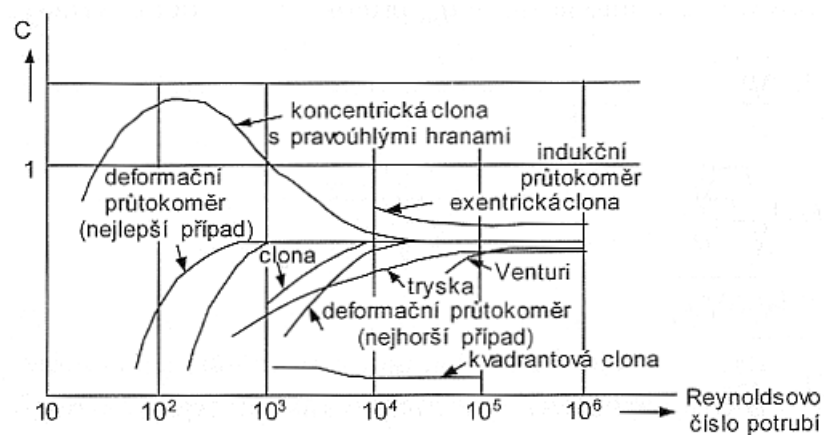
$$Q_V = C_\epsilon \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (1.13)$$



Obr. 1.12: Rozdělení statického tlaku v okolí škrtícího členu

kde  $C$  je průtokový součinitel škrtícího členu,  $\epsilon$  expanzní součinitel a  $\rho$  hustota proudící tekutiny.

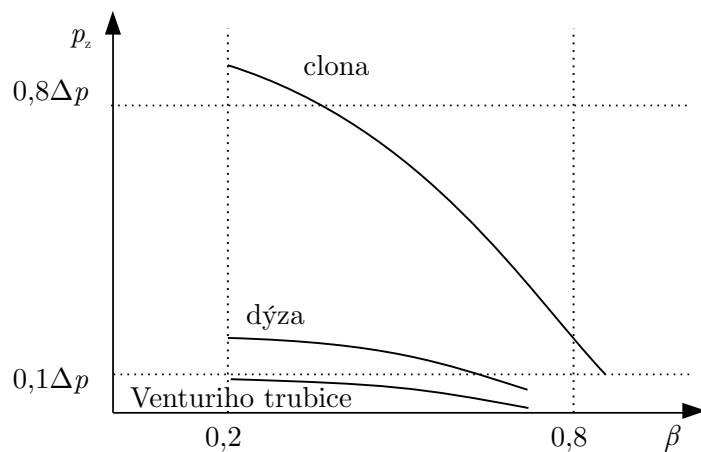
Expanzní součinitel  $\epsilon$  je bezrozměrná veličina, která nabývá u kapalin hodnoty  $\epsilon = 1$  a u plynů hodnot  $\epsilon < 1$ . Průtokový součinitel škrtícího členu  $C$  je rovněž bezrozměrná veličina, která se určuje z tabulek a grafů, je závislá na hodnotě Reynoldsova čísla a poměrném zúžení  $\beta = d/D$ , kde  $d$  je průměr otvoru škrtícího členu a  $D$  průměr potrubí. Graf na obr. 1.13 zobrazuje závislost  $C$  na Reynoldsově čísle pro různé škrtící členy. Důležitým faktorem je i tlaková ztráta škrtícího členu v závislosti na  $\beta$ , viz obr. 1.14 [3].



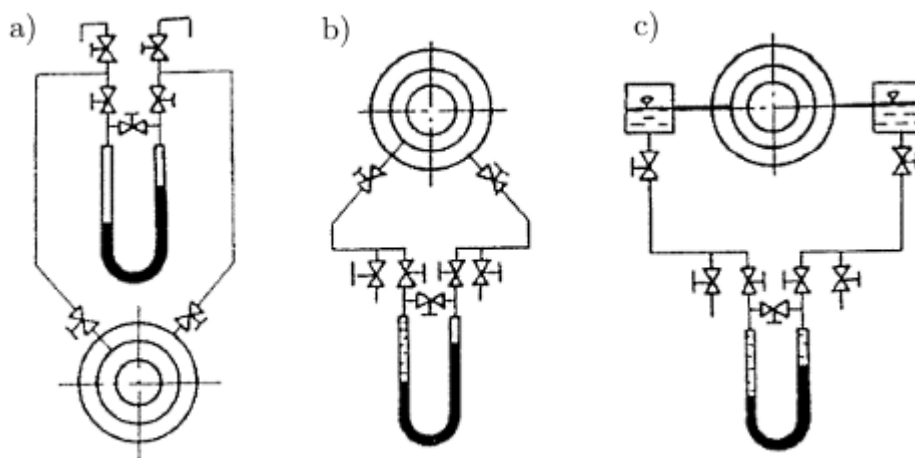
Obr. 1.13: Průtokový součinitel  $C$  pro různé škrtící členy a jeho závislost na Reynoldsově čísle [3]

Na snímání tlaku se obvykle užívá kapalinový diferenční manometr k jehož otvorům se tlak přivádí pomocí impulsního potrubí v prostorové konfiguraci závislé na tom zda je měřeným médiem kapalina, plyn nebo sytá pára podle obr. 1.15 [2].

**Clony** *Koncentrická clona* představuje desku s kruhovým otvorem, která se vkládá mezi příruby potrubí, jak je znázorněno na obr. 1.16. Střed kruhového otvoru koncentrické clony se nachází v ose potrubí, viz obr. 1.17a. Vyrábí se zejména z nerezové ocele, hodnota koeficientu poměrného zúžení  $\beta$  bývá u clon mezi 0,3 až 0,7. Užívá se pro měření čistých kapalin, plynů a par turbulentně proudících v potrubích do  $D = 150$



Obr. 1.14: Závislost trvalé tlakové ztráty  $p_z$  na poměrném zúžení  $\beta$



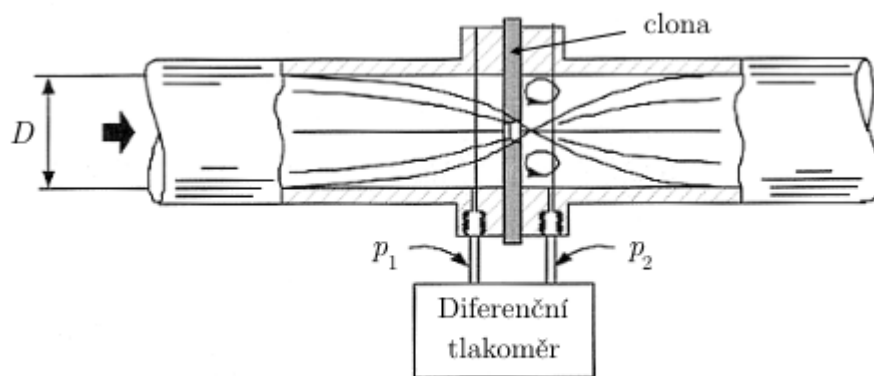
Obr. 1.15: Prostorová konfigurace průtočného potrubí, manometru a impulsního potrubí u a) kapalin, b) plynů a c) par [2]

mm s  $Re$  v intervalu  $2 \cdot 10^4$  až  $1 \cdot 10^7$ . Rovnoměrný rychlostní profil proudící tekutiny lze zaručit instalací clony do přímého úseku potrubí o délce  $10D$  až  $15D$  před clonou a délce  $5D$  až  $10D$  za clonou [3].

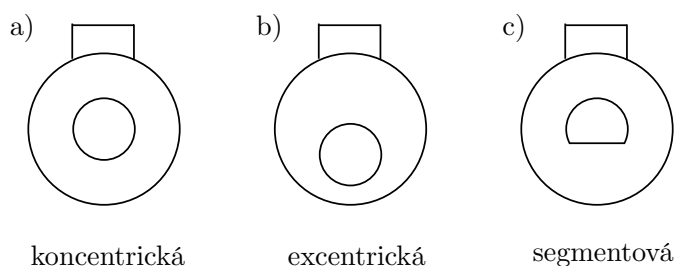
Tlakový rozdíl  $\Delta p$  se nejčastěji měří pomocí otvorů na přírubách ve vzdálenosti asi 25 mm před a za clonou, viz obr. 1.16. Ve srovnání s ostatními průtokoměry je trvalá tlaková ztráta  $p_z$  clon největší a může dosahovat až 80 % tlakového rozdílu clony  $\Delta p$  a její přibližnou hodnotu lze získat užitím semiempirického vztahu

$$p_z = \Delta p(1 - \beta^2). \quad (1.14)$$

Pro odvod kapalného kondenzátu při měření průtoku plynů, resp. odvod bublinek plynu při měření kapaliny jsou určeny malé výpustné otvory ve spodní části, resp. horní části potrubí v okolí clony o velikosti zhruba 10 % hlavního otvoru.



Obr. 1.16: Umístění clony v měřicím potrubí [3] (upraveno)



Obr. 1.17: Druhy clon

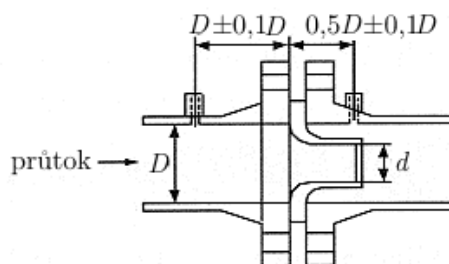
Přesnost samotné clony bývá mezi 0,6 až 2 % AR. Na výsledné nejistotě měření se však podílí více vlivů, zejména pak přesnost geometrie otvoru clony, usazování sekundární fáze proudící tekutiny a nečistot v okolí otvoru, délka uklidňujícího přímého úseku potrubí a deformace clony efektem „vodního kladiva“. Celková nejistota měření pak může dosahovat až 5 % AR.

Problém s usazováním sekundární fáze tekutiny lze vyřešit použitím *koncentrické clony* ve vertikálně orientovaném potrubí nebo užitím nestandardních druhů clon. Patří mezi ně *excentrická clona*, která má otvor kruhového tvaru, viz obr. 1.17b, jehož střed je však posunut směrem nahoru, jestliže chceme minimalizovat vliv plynové fáze na měření průtoku kapaliny nebo směrem dolů jestliže se v kapalině nachází pevné částice nebo jestli měříme plyn v němž se může tvořit kapalný kondenzát. *Segmentová clona* oproti tomu má tvar výseče kruhu jehož střed prochází osou potrubí, viz obr. 1.17c. Je vhodná pro tekutiny obsahující velký podíl sekundární fáze, např. nasycenou páru, olej s vodními kapkami nebo tekutiny s pevnými částicemi [3].

**Dýza** Jedná se o trysku uchycenou mezi příruby měřícího potrubí, jak je vidět na obr. 1.18. Za průměr otvoru  $d$  je zde považován průměr konce trysky ve směru průtoku. Vyrábí se ve variantách se zúžením  $\beta$  0,2 až 0,5 nebo  $\beta$  0,45 až 0,8. Na snímání tlaku



jsou v měřicím potrubí určeny otvory ve vzdálenosti přibližně  $1D$  před počátkem trysky a přibližně  $0,5D$  za počátkem trysky. Stejně jako u clon, i zde je nutnost umístění do uklidňovacího přímého úseku potrubí. [3].



Obr. 1.18: Normalizovaná dýza ASME [3] (upraveno)

Dýza se užívá pro měření čistých kapalin, plynů. Je s ní možné měřit průtok tekutin o vysoké teplotě i rychlosti. Nejistota měření je běžně kolem 1 % AR. Dýzy kalibrované pro měření plynů však mohou dosahovat nejistot menších než 0,25 % AR. Výhodami jsou obvykle nízká pořizovací cena a menší tlaková ztráta  $p_z$  oproti clonám. Nevýhodou je, že dýzy pracují optimálně při  $Re > 50\,000$  a nemožnost měření znečištěných tekutin [3].

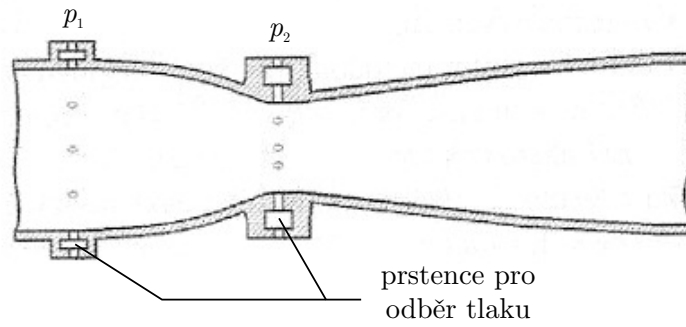
**Venturiho trubice** V porovnání s clonou a dýzou má díky svému tvaru Venturiho trubice nejnižší tlakovou ztrátu, viz obr. 1.19. Na bezproblémové snímání tlaku jsou určeny prstencové dutiny po stranách trubice, které jsou na rozdíl od klasických otvorů odolné proti usazeninám. Narozdíl od clony a dýzy nevyžaduje Venturiho trubice dlouhý uklidňovací úsek potrubí [3].

Venturiho trubice je vhodná pro měření čistých a ve speciálním provedení i znečištěných tekutin. Mezi výhody patří malá tlaková ztráta  $p_z$  obvykle menší než  $0,1\Delta p$ , viz obr. 1.14, odolnost vůči korozi, usazeninám a nízké náklady na údržbu. Nevýhodou naopak je vysoká pořizovací cena. Minimální  $Re$  pro optimální provoz Venturiho trubice je 75 000 [3].

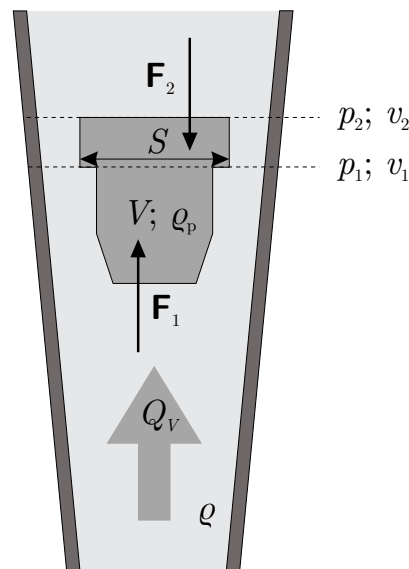
## 1.4 Rotametry

Uvnitř vertikálně orientované trubice kuželovitěho tvaru v principiálním uspořádání na obr. 1.20, se nachází plováček o ploše  $S$ , objemu  $V$ , vyroben z materiálu o hustotě  $\rho_p$ .

Zesponu nahoru proudí tekutina o hustotě  $\rho$ . Díky proměnnému průřezu trubice se liší rychlosti  $v_1$  a  $v_2$  u spodní a vrchní části plováčku a statické tlaky  $p_1$  a  $p_2$ . Na



Obr. 1.19: Venturiho trubice [3] (upraveno)



Obr. 1.20: Princip fungování rotametru

plováček působí řídicí síla  $F_1$  působící ve směru proudu

$$F_1 = p_1 S + V \rho g + \frac{1}{2} S \rho v_1^2, \quad (1.15)$$

kde zleva do prava první člen je tlaková síla působící na plochu plováčku zespodu, druhý člen je vztlaková síla působící na plováček a třetí člen je dynamická tlaková síla působící na plochu plováčku zespodu úměrná rychlosti proudění tekutiny. Proti síle  $F_1$  působí řídicí síla  $F_2$  skládající se z tlakové síly působící zeshora na plochu plováčku a tíhové síly.

$$F_2 = p_2 S + V \rho_p g. \quad (1.16)$$

Porovnáním rovnic (1.15) a (1.16) dostaneme pro rychlost  $v_1$  vztah

$$v_1^2 = \frac{2Vg}{S\rho} (\rho_p - \rho) - \frac{2\Delta p}{\rho}. \quad (1.17)$$

Dosažením vztahu (1.17) do Bernoulliho rovnice (1.7) získáme pro rychlost  $v_2$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2Vg}{S\rho}(\rho_p - \rho)}. \quad (1.18)$$

Pro objemový průtok  $Q_V$  prstencem mezi horním koncem plováku a stěnou trubice platí

$$Q_V = C_z S_c v_2, \quad (1.19)$$

kde  $C_z$  je ztrátový součinitel a  $S_c$  je obsah prstence. Ztrátový součinitel  $C_z$  je závislý na viskozitě tekutiny. Mění se rovněž se změnou rychlosti při laminárním proudění naopak při turbulentní proudění je přibližně konstantní. Platí-li pro plováček  $\rho_p = 2\rho$ , pak lze vztah pro objemový průtok  $Q_V$  napsat jako

$$Q_V = C_z S_c \sqrt{\frac{2Vg}{S}}. \quad (1.20)$$

Zvýší-li se průtok  $Q_V$ , posune se plováček nahoru a zvětší se tím i obsah prstence  $S_c$ , který je měronosnou veličinou rotometru. V praxi však neměříme obsah prstence, nýbrž svislou polohu plováčku, kterou odečítáme ze stupnice ocejchované v jednotkách objemového průtoku [3].

S rotametry lze měřit průtok relativně širokého spektra tekutin. Pro průtok demineralizované vody a korozivních látek se používají trubice a plováčky z plastických materiálů zatímco pro horkou vodu, silné kyseliny, louhy, roztavené kovy jsou vhodné kovové rotametry. Nicméně tekutiny obsahující vlákna a velké částice mohou zanášet trubici rotometru a ovlivňovat tak výsledek měření [3].

Rotametry mohou měřit průtok kapalin do  $75 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a plynů do  $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Kalibrované laboratorní rotametry jsou schopné měřit s nejistotou 0,25 % AR při relativní rozsahu 4:1 oproti tomu průmyslové rotametry mohou měřit v relativním rozsahu až 10:1, jejich nejistota je však mezi 1 až 2 % FS. Změny viskozity mají na funkci rotametry zanedbatelný vliv. V závislosti na konstrukci rotametry může být maximální statický tlak v potrubí až 5 MPa [3].

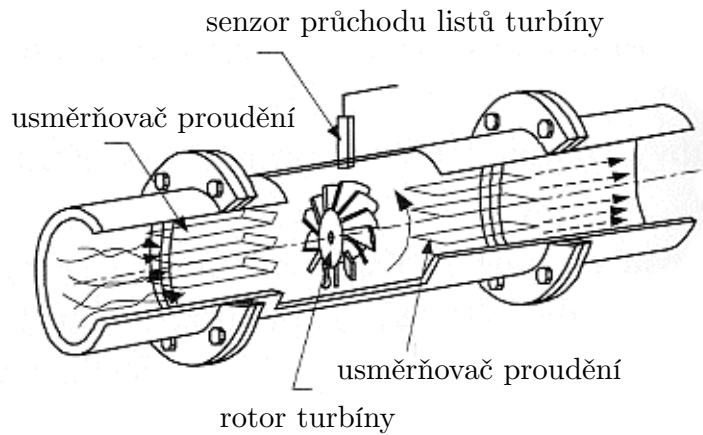
## 1.5 Turbínové průtokoměry

Jsou založené na roztáčení turbíny vlivem protékající tekutiny. Objemový průtok se určuje z počtu průchodů listů turbíny polohovým snímačem, viz obr. 1.21. Každý průchod snímačem vyvolá elektrický impulz, který se dále zesílí a vytvaruje. Proto je v tomto případě výhodné využít jako měronosnou veličinu frekvenci impulzů  $f$ , která

je v ideálním případě lineárně závislá na objemovému průtoku  $Q_V$  vztahem

$$f = K_t Q_V \quad (1.21)$$

kde  $K_t$  je převodní součinitel turbínového snímače. V reálné situaci je linearita obvykle zaručena v měřicím rozsahu od 10 % do 100 %. Polohový snímač bývá v případě kovových turbínek indukční, v případě plastových turbínek se používá snímač optometrický. Pro uklidnění turbulentního proudění se před a za turbínu vkládá usměrňovač proudění [2, 3].



Obr. 1.21: Schéma turbínového průtokoměru [3]

Standardní konstrukční provedení dovolují provozovat v rozmezí teplot od  $-200$  do  $200$  °C, při tlacích až do 32 MPa, průřezu potrubí od 5 do 70 mm, jmenovitém průtoku  $1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  až  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a rozsahu Reynoldsova čísla  $4 \cdot 10^3$  až  $2 \cdot 10^4$ . Přesnost bývá až 0,5 %. Existují i kryogenní, resp. vysokoteplotní provedení, který umožňují turbínkové a lopatkové průtokoměry provozovat i při teplotách od  $-273$  °C, resp. do 500 °C [2, 3].

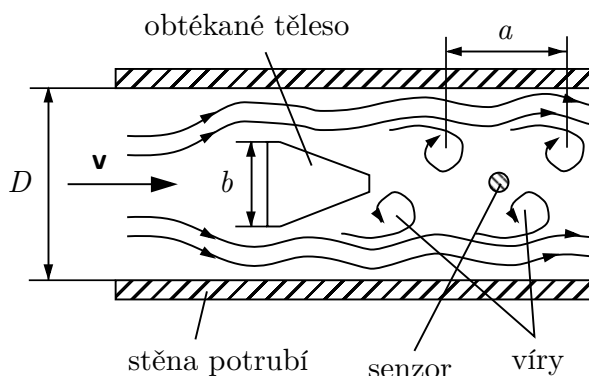
## 1.6 Vírové průtokoměry

Jedná se o rychlostní průtokoměry založené na měření frekvence Karmanových vírů vznikajících za tekutinou obtékaném tělese vhodného tvaru, viz obr 1.22. Frekvence  $f$  vírů v kruhovém potrubí o obsahu průřezu  $S$  je přímo úměrná objemovému průtoku  $Q_V$  podle vztahu

$$Q_V = \frac{Sb}{St} f = \frac{1}{K} f \quad (1.22)$$

kde  $b$  je šířka obtékaného tělesa,  $St$  je Strouhalovo číslo a  $K$  je převodní součinitel vírového průtokoměru. Vhodné jsou zejména tělesa hranolovitého tvaru s rovnou základnou

umístěnou kolmo na směr proudění, díky kterým je možné v širokém intervalu Reynoldsových čísel uvažovat převodní součinitel  $K$  za konstantní a tedy závislost objemového průtoku  $Q_V$  na frekvenci víru  $f$  je lineární [2, 3].



Obr. 1.22: Princip fungování vírového průtokoměru

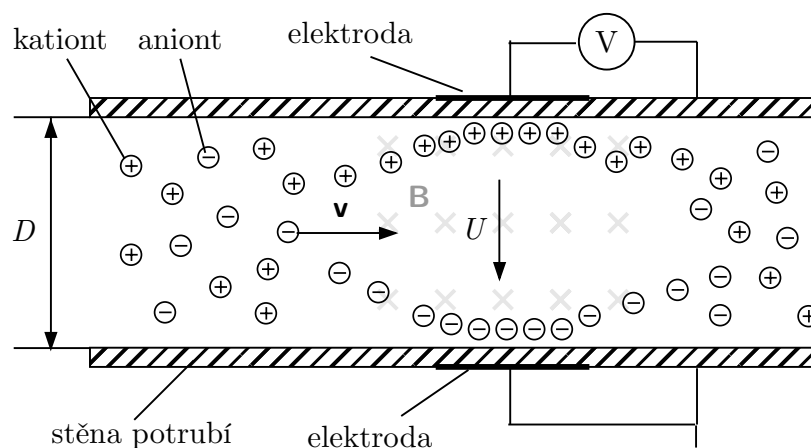
Hranolovité těleso použité ke konstrukci vírového průtokoměru se může od jiných lišit tvarem a velikostí. Pro minimalizaci nejistot měření je nutné těleso umístit do uklidňovacího potrubí o délce  $10D$  před tělesem a  $5D$  za tělesem. Snímač frekvence vírů bývá volen s ohledem na výstupní signál a může být ultrazvukový (frekvenční výstup), piezoelektrický (proudový výstup), kapacitní nebo termistorový. Vírové průtokoměry jsou vhodné pro měření průtoku kapalin nízké viskozity, která se s teplotou příliš nemění (chladicí směsi), pohonných plynů a par o nízké teplotě. Výhodou je snadná montáž, vysoká přesnost měření, velký měřicí rozsah a dlouhodobá životnost [2].

Vírové průtokoměry jsou schopné měřit průtoky kapalin od 14 až do  $8\,700\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  u plynů až  $10\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ . Poměr mezi maximální a minimální měřitelnou hodnotou průtoku vírového průtokoměru bývá od 20:1 až do 50:1, přesnost až 0,5 %, viz tab. 1.2. Vyrábějí se pro maximální teplotu tekutiny  $200\text{ }^\circ\text{C}$  a tlak  $10\text{ MPa}$  [2].

## 1.7 Elektromagnetické průtokoměry

Již více než 50 let nacházejí elektromagnetické průtokoměry uplatnění při měření průtoku elektricky vodivých tekutých látek kapalného charakteru a to zejména v potravinářství, energetice, chemickém, těžařském a papírenském průmyslu a také v čistírnách odpadních vod. Princip činnosti je znázorněn na obr. 1.23. Při průtoku elektricky vodivé tekutiny o rychlosti  $v$  v homogenním magnetickém poli o magnetické indukci  $B$  dochází k vychýlení nabitých iontů obsažených v tekutině na stranu k měřicím elektrodám vzdálených od sebe  $D$  a vzniká tak elektrické napětí  $U$  úměrné velikosti rychlosti  $v$  podle vztahu

$$U = vBD \quad (1.23)$$



Obr. 1.23: Měření průtoku vodivé kapaliny elektromagnetickým průtokoměrem

Mezi hlavní výhody elektromagnetických průtokoměrů patří nezávislost měření na viskozitě a hustotě tekutiny a bezdotykové měření, jelikož průtokoměr neobsahuje žádné mechanické pohyblivé části a proto nedochází k ovlivnění toku tekutiny. Nevýhodou jsou ovšem požadavky na minimální vodivost tekutiny, která navíc musí být rozložena rovnoměrně v tekutině. Potrubí, ve kterém měříme průtok, musí být elektricky nevodivé a měřicí elektrody průtokoměru musejí být trvale zatopené, aby se nepoškodily. Průtokoměr nelze použít k měření průtoku plynů nebo par, tekutina musí být kapalného charakteru, může však mít libovolnou viskozitu a obsahovat i velké množství částic o velikosti až 50  $\mu\text{m}$ . Mezi ty často měřené patří různé šťávy, pasty, kašovitě hmoty, ale také kyseliny, louhy, kaly a další často chemicky agresivní látky. Umožňuje měřit průtoky  $5 \text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$  až  $12\,000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  v poměrném rozsahu 100:1 a lepší s přesností až 0,25 % z měřené hodnoty. Standardně funguje při teplotách  $-20$  až  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  a vodivosti tekutiny vyšší než  $5 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Jelikož časem dochází k zanášení elektrod, snižuje se tím i přesnost průtokoměru. Přístroj je tedy nutné pravidelně posílat k čištění elektrod, ověření a kalibraci [2, 9].

## 1.8 Ultrazvukové průtokoměry

Ultrazvukové průtokoměry jsou rychlostní snímače objemového průtoku využívající změny rychlosti šíření nebo frekvence ultrazvukových vln vlivem protékající tekutiny. Součástí průtokoměru jsou ultrazvukové měniče, které dokážou pracovat nejen jako generátor, ale i jako přijímač ultrazvukových vln.

Podobně jako elektromagnetické průtokoměry i ultrazvukové průtokoměry představují neinvazivní způsob měření objemového průtoku, který nemá vliv na rozdělení tlaku v

celém potrubním okruhu. Ultrazvukové průtokoměry se však dají využít pro cenově výhodná měření průtoků od 2 do 400 000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> s přesností lepší než 1 %. Vydrží tlak až 100 MPa a jsou schopné pracovat i v potrubích s průměrem větším než 3 m.

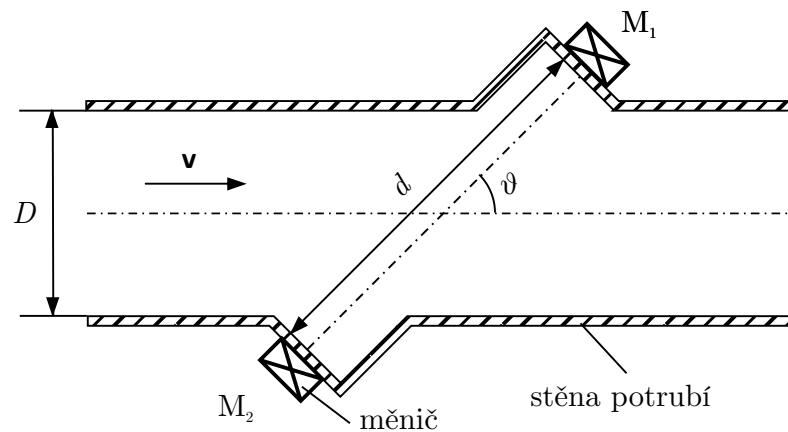
V praxi se nejčastěji používají přímé ultrazvukové nebo dopplerovské průtokoměry [2, 3].

### 1.8.1 Přímé ultrazvukové průtokoměry

Metoda měření je založena na tom, že proud tekoucího média zpomaluje ultrazvukovou vlnu vyslanou měničem M<sub>1</sub> ve směru proti proudu zatímco vlnu vyslanou měničem M<sub>2</sub> ve směru proudu zrychluje, viz obr. 1.24. Každý měnič funguje zároveň jako detektor vln vyslaných druhým měničem. Měří se rozdíl  $\Delta t$  časů šíření obou vln od jednoho měniče k druhému. Ten je s objemovým průtokem  $Q_V$  svázaný vztahem

$$Q_V = Sv \approx S \frac{c_0^2}{2d \cos(\theta)} \Delta t \quad (1.24)$$

kde  $\theta$  je úhel, který svírá osa měničů s osou potrubí,  $d$  vzájemná vzdálenost měničů a  $c_0$  rychlost zvuku v dané tekutině. Je jasné, že pokud  $\Delta t = 0$ , pak je tekutina v potrubí v klidu. Ve vztahu (1.24) jsme pro zjednodušení tvaru vzorce předpokládali, že  $c_0^2 \gg v^2$  [2].

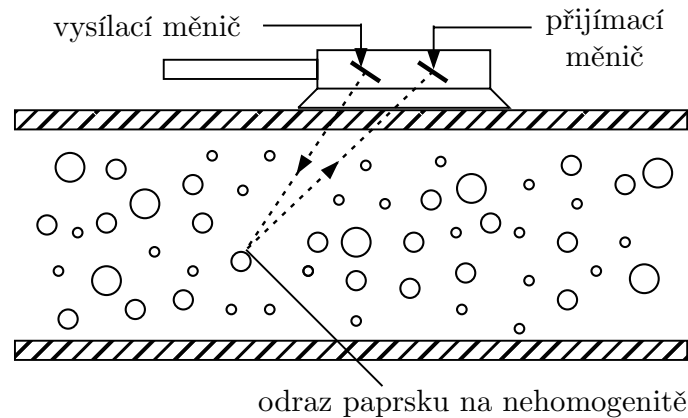


Obr. 1.24: Přímý ultrazvukový průtokoměr

### 1.8.2 Dopplerovské průtokoměry

Principem tohoto typu ultrazvukových průtokoměrů je, že ultrazvukový měnič vyšle vlnu o základní frekvenci  $f_0$ , a po odražení od různých nehomogenit (pevné částice,

bubliny) obsažených v kapalině pohybující se rychlostí  $v$  dojde k její změně o  $\Delta f = f - f_0$ , kde  $f$  je frekvence odražené vlny detekované přijímacím měničem, viz obr. 1.25.



Obr. 1.25: Příložný dopplerovský průtokoměr

Z matematického popisu Dopplerova principu a předpokladu  $(v/c_0) \cos(\theta) \ll 1$ , kde  $\theta$  je úhel dopadu ultrazvukového paprsku na nehomogenitu, lze pro objemový průtok  $Q_V$  odvodit přibližný vzorec

$$Q_V = Sv \approx S \frac{c_0}{2f_0 \cos(\theta)} \Delta f \quad (1.25)$$

kde  $c_0$  je rychlost šíření ultrazvukové vlny [2, 3].

Běžné výrobní postupy využívající ultrazvukový vysílač o frekvenci 1 MHz si žádají koncentraci minimálně 0,01 % nehomogenit v libovolném látkovém množství kapaliny s minimální velikostí 100  $\mu\text{m}$  s klesající frekvencí vysílače jsou požadavky na koncentraci a velikost nehomogenit vyšší. Nedá se s nimi měřit pitná nebo destilovaná voda. Příkladem aplikace je měření průtoku krve v cévách, kde jako nehomogenity v tekoucí kapalině slouží červené krvinky nebo měření průtoku kalů. Výhodou je možnost bezkontaktního měření příložným průtokoměrem [2, 10].

## 1.9 Coriolisovy průtokoměry

Coriolisovy hmotnostní průtokoměry jsou velmi oblíbenou skupinou průtokoměrů určených pro provozní měření. Využit se však dají i pro laboratorní měření velmi malých průtoků.

Princip měření je založen na využití jevu Coriolisovy síly, který vzniká jako důsledek setrvačnosti tekutiny, pohybující se v kmitající měřicí trubici. Velikost Coriolisovy síly je úměrná hmotnostnímu průtoku, proto se Coriolisovy průtokoměry řadí mezi snímače hmotnostního průtoku. Existují Coriolisovy průtokoměry s přímou trubicí i

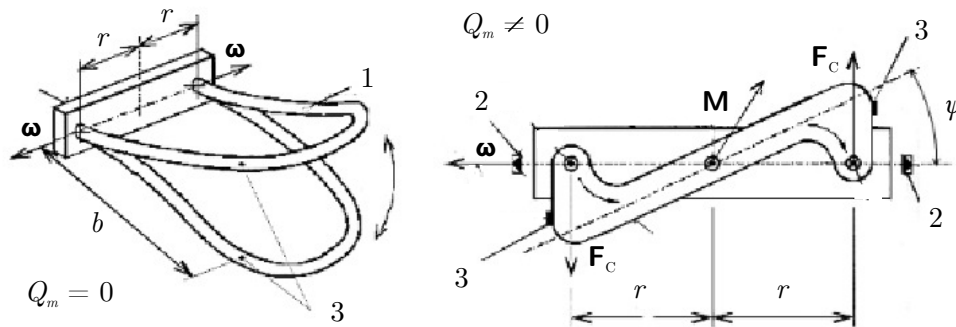


průtokoměry s trubicí zakřivenou, která nejčastěji nabývá tvar písmene U. Na geometrii trubice závisí konkrétní způsob měření [3, 11].

U průtokoměrů se *zakřivenou U trubicí* kmitající úhlovou frekvencí  $\omega$  jedním otvorem vtéká dovnitř tekutina o hmotnostním průtoku  $Q_m$  a druhým odtéká, viz obr. 1.26. Výsledkem je, že na úseky trubice o délce  $b$  (1), kolmé na osu kmitání, působí Coriolisovy síly o velikosti  $F_C$  směřující na jednu stranu u vtokové části a na opačnou u výtokové. Vzniká moment dvojice sil o velikosti  $M$  způsobující zkroucení trubice, který je v rovnováze s řídicím momentem  $M_D$  závislým na celkové tuhosti trubice  $K$  a určuje tak úhel zkroucení roviny  $\psi$ , ve které leží U trubice při daném hmotnostním průtoku  $Q_m$

$$M = 4rb\omega Q_m = M_D = K\psi. \quad (1.26)$$

kde  $r$  je rameno síly.



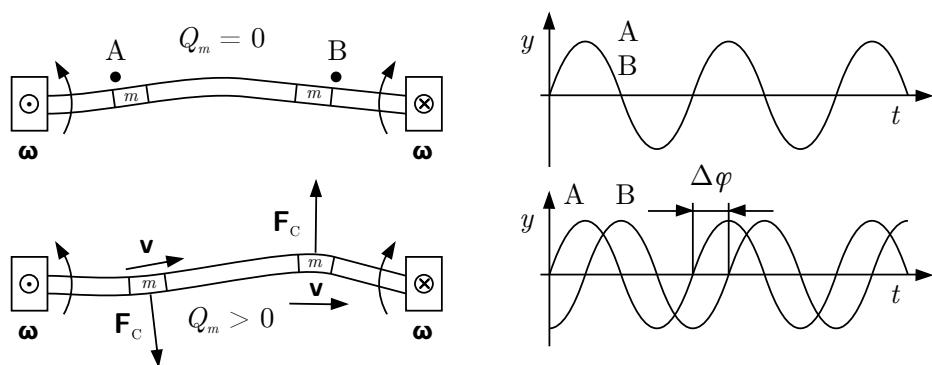
Obr. 1.26: Coriolisův průtokoměr s U trubicí [3] (upraveno)

Z ( 1.26) vyplývá, že informaci o měřeném hmotnostním průtoku  $Q_m$  poskytuje úhel zkroucení měřicí trubice  $\psi$

$$Q_m = \frac{K}{4db\omega} \psi. \quad (1.27)$$

Deformace měřicí trubice vlivem průtoku se měří dvěma snímači polohy (2), jež jsou umístěné po stranách U trubice a interagují s tělesem připevněné k trubicí (3) [3].

Průtokoměry s *přímou trubicí* mají menší citlivost, neboť deformace způsobená setrvačností tekutiny, je mnohem menší než u průtokoměrů se zakřivenou trubicí. Konce trubice harmonicky oscilují kolem své vlastní osy se stejnou frekvencí, viz obr. 1.27. Snímače polohy A, B umístěné u obou konců měří fázi kmitání, ve které se daná část trubice nachází. Je-li tekutina v trubicí v klidu, pak je fázový rozdíl obou konců trubice nulový. Při průtoku měřeného média vzniká mezi oběma oscilacemi fázový rozdíl vlivem toho, že Coriolisovy síly na obou koncích mají opačný směr. Čím větší hodnotu má hmotnostní průtok  $Q_m$ , tím je větší Coriolisova síla  $F_C$  a tím je i větší fázový rozdíl  $\Delta\varphi$  kmitajících konců trubice [3].



Obr. 1.27: Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí

Coriolisovy průtokoměry jsou využívány především v potravinářském, chemickém a farmaceutickém průmyslu pro měření širokého spektra látek od čistých plynů a kapalin až po různé tekuté směsi a kaly. Výhodou měření hmotnostního průtoku je nezávislost na změnách vlastností proudící tekutiny (hustota, viskozita, teplota a tlak). Z údaje o frekvenci kmitání trubice lze pomocí vyhodnocovací elektroniky určit hustotu proudící tekutiny a přepočítat hmotnostní průtok na objemový. Chyba měření hustoty bývá zpravidla menší než  $\pm 2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Nevýhodou Coriolisových průtokoměrů jsou obecně vysoké pořizovací náklady. Ty jsou však vyváženy možností měření hmotnostního průtoku prakticky čehokoli od mléka a piva až po rozemleté maso v rozpětí od  $0,05 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  až do  $500 \text{ t}\cdot\text{h}^{-1}$  s přesností  $0,1 \text{ \% AR}$  a opakovatelností až  $0,05 \text{ \% AR}$ . Coriolisovy průtokoměry pracují při teplotách od  $-240$  až  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  a tlaku tekutiny až  $30 \text{ MPa}$  v závislosti na konstrukci. Čištění a sterilizace se dá provádět párou do teploty  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jsou vhodné zejména do provozů, kde je potřeba velmi přesného dávkování surovin [11, 12].

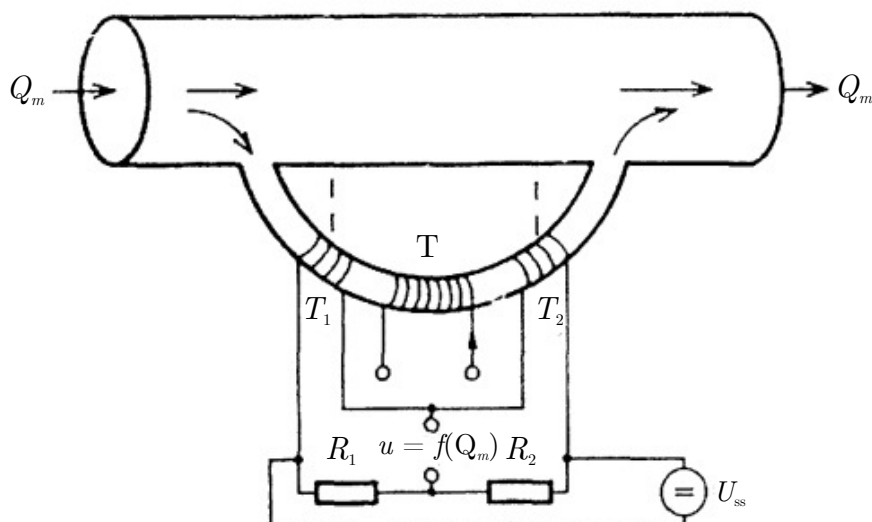
## 1.10 Tepelné průtokoměry

Princip je zobrazen na obr. 1.28. Tekutina protékající boční větví měřicí trubice je ohřívána topným tělesem T. Rozdíl teplot  $T_2 - T_1$  tekutiny za topným a před topným tělesem je úměrný hmotnostnímu průtoku  $Q_m$  podle vztahu

$$Q_m = \frac{\dot{Q}}{c(T_2 - T_1)} \quad (1.28)$$

kde  $\dot{Q}$  je tok tepla vydávaného topným tělesem T [2].

Tepelné průtokoměry se používají především pro měření průtoku plynů od 3 do 30 000 ml·s<sup>-1</sup>, protože jejich měrnou tepelnou kapacitu  $c$  lze v obvyklém rozsahu provozních teplot a tlaků považovat za konstantní [2].



Obr. 1.28: Princip tepelného průtokoměru [2] (upraveno)

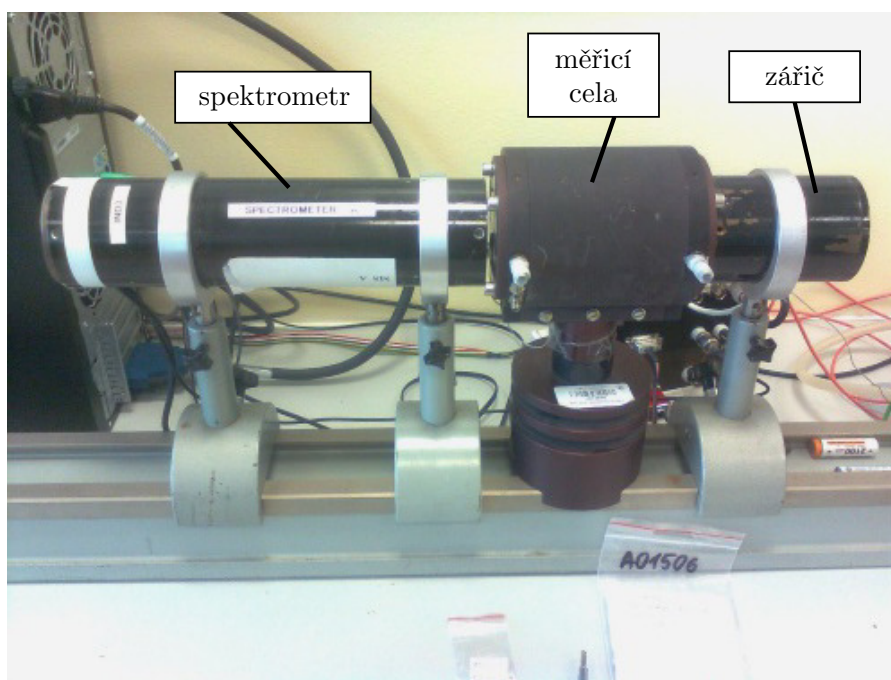
	Přesnost [% FS]	Poměrný rozsah [TR]	Výstup	Použití
Nespojitý objemový	< 0,1	-	lineární	plyny a čisté kapaliny s malou viskozitou, etalonáž
Spojité objemový	0,1-2	100-200:1	lineární	měřidla proteklého množství surovin
Škrťící členy	0,5-2	4-8:1	odmocnina	průmyslová měření, dnes však již málo užívané
Rychlostní sondy	2-5	3-10:1	odmocnina	jednorázová měření
Rotametry	0,5-5	10:1	přibližně lineární	běžná laboratorní a provozní měření
Turbínové	0,1-2	20:1	lineární	k měření i za vysokých tlaků a teplot
Vírové	0,5-1	20-50:1	lineární	náhrada za škrťící členy, snadné číslicové zpracování, nevhodné pro malé průtoky
Elektromagnetické	0,5-2	30-100:1	lineární	měří pouze el. vodivé kapaliny, zanedbatelný vliv teploty, necitlivý na změny hustoty, viskozity a tlaku
Přímé ultrazvukové	0,1-1	30:1	lineární	neinvasivní metoda měření, náročné technické provedení i kalibrace
Dopplerovské	1-3	30:1	lineární	měřená tekutina musí obsahovat částice odrážející zvuk, použitelný k měření znečištěných tekutin, existují i v příložné variantě
Tepelné	0,5-2	50-100:1	závisí na typu	vhodné pro provozní i laboratorní měření malých průtoků
Coriolisovy	0,1-2	50-500:1	lineární	nezávislý na změnách hustoty, viskozity, tlaku i teploty tekutiny

Tab. 1.2: Typické metrologické vlastnosti a využití průtokoměrů [7]

## Kapitola 2

# Návrh a realizace experimentu

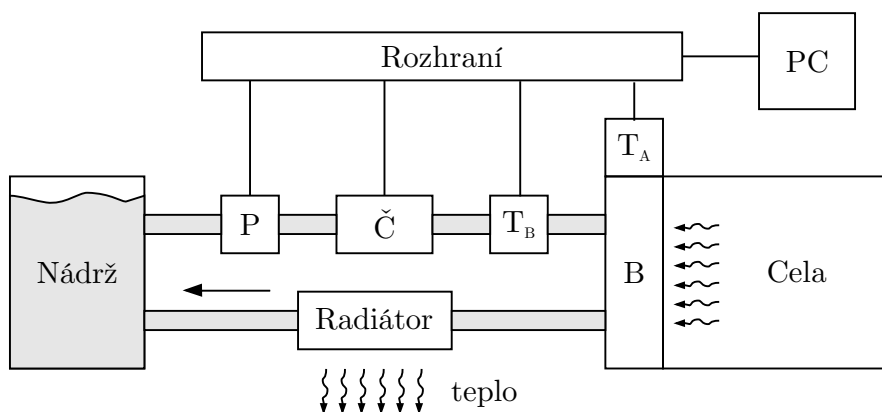
Chladicí okruh bude plnit funkci jakéhosi „tepelného štítu“, tzn. bude bránit prostupu tepla z měřicí cely Mössbauerova spektrometru do prostoru, ve kterém by jeho akumulace mohla vést ke zvýšení teploty nad únosnou mez. To je nutné respektovat zejména v případě, že se v tomto prostoru nacházejí měřicí přístroje citlivé právě na změnu teploty. Tato změna totiž může dočasně nebo trvale ovlivnit jejich charakteristiky a ovlivnit tím negativně přesnost výsledků poskytovaných těmito přístroji. V nejhorším případě pak může dojít k nevratnému poškození přístroje a tím i jeho trvalému vyřazení z provozu. Na obr. 2.1 je měřicí cela společně s další aparaturou Mössbauerova spektrometru.



Obr. 2.1: Mössbauerův spektrometr s měřicí celou

## 2.1 Chladicí okruh a jeho součásti

Schéma na obr. 2.2 vysvětluje, jak chladicí okruh funguje. Chladicí kapalina je uchovávána v nádrži. Z té je pomocí čerpadla Č cyklicky přiváděna přes systém trubic a hadiček až do tzv. chladicího bloku. Zde pojme teplo, kterého se chceme zbavit a teče dál přes radiátor, kde toto teplo vyzáří, zpět do nádrže. Průtokoměr P je umístěn na cestě mezi čerpadlem a chladicím blokem, aby se minimalizovala nejistota měření průtoku spojená se změnou teploty protékajícího chladiva. Snímač  $T_A$  monitoruje teplotu na povrchu chladicího bloku,  $T_B$  pak sleduje teplotu chladicí kapaliny v nádrži. Jak průtokoměr, tak i snímače teploty mohou mít napěťový vývod, který umožňuje pomocí vhodného rozhraní sledovat hodnoty výstupu snímačů na obrazovce PC. Čerpadlo lze řídit buď ručně nebo přes rozhraní pomocí PC.



Obr. 2.2: Schéma chladicího okruhu pro celu Mössbauerova spektrometru

**Chladicí blok** Je kovová struktura bránící pronikání tepla z vyhřívané cely do vnějšího prostoru. Obsahuje kanálky, kterými protéká chladicí kapalina. Důvodem použití kovů pro konstrukci chladicího bloku je bez výhrad vysoký součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$  oproti jiným látkám, tj. rychlost jakou se teplo šíří v daném materiálu a tedy i ke stěnám kanálků, kde je toto teplo přeneseno do proudícího chladiva. Z tab. 2.1 je vidět, že nejlepší tepelnou vodivost má stříbro. To má však vysokou tržní cenu a proto se jako kompromis mezi cenou a žádanými vlastnostmi nabízí měď a hliník.

**Chladicí kapalina** Funkcí chladicí kapaliny je udržovat teplotu vnější strany chladicího bloku na co nejnižší možné hodnotě a minimalizovat tak přenos tepla do vnějšího prostoru, který by mohl zvýšit jeho teplotu nad kritickou mez dovolenou výrobcem měřicích přístrojů.

Při ustáleném proudění tekutiny je hustota tepelného toku  $\dot{q}$  mezi proudícím chladivem a kanálkem chladicího bloku závislá na rozdílu teplot chladiva a vnitřní strany

	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Stříbro (27 °C) [13]	429
Měď (27 °C) [13]	401
Měď (327 °C) [13]	379
Zlato (27 °C) [13]	317
Hliník (27 °C) [13]	237
Hliník (327 °C) [13]	231
Mosaz (20 °C) [5]	106
Železo (27 °C) [13]	80,2
Ocel 0,2 % C (20 °C) [5]	50

Tab. 2.1: Součinitel tepelné vodivosti některých kovů a slitin

kanálku  $\Delta T$  podle vztahu

$$\dot{q} = h\Delta T, \quad (2.1)$$

kde  $S$  je obsah styčné plochy chladiwa a kanálků a  $h$  součinitel prostupu tepla jehož hodnota mj. závisí na součiniteli tepelné vodivosti chladicí kapaliny  $\lambda$ . Čím vyšší je  $\lambda$  chladicí kapaliny, tím více tepla se do kapaliny přenese za jednotku času [14].

Velmi důležitou charakteristikou chladicí kapaliny je její měrná tepelná kapacita  $c$ . Ta uvádí, kolik je nutné dodat jednotce hmotnosti kapaliny tepla, aby se ohřála o jednotku teploty. Pro účinné chlazení musí být měrná tepelná kapacita chladicí kapaliny co nejvyšší, jinak dochází ke snadnému ohřevu chladiwa a tím i snížené účinnosti chlazení. Tab. 2.2 nabízí srovnání různých chladicích médií.

	$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
Voda (20 °C) [5]	0,598	4180
Vzduch (20 °C) [15]	0,0252	1010

Tab. 2.2: Srovnání parametrů chladicích médií

Kapalinu je nutné udržovat v takovém stavu, aby se v ní nemnožily mikroorganismy, nedocházelo k jejímu úniku do volného prostoru, např. odpařováním a nebyly v ní obsaženy nečistoty zanášející trubky a hadice okruhu. Dále požadujeme, aby chladicí kapalina měla malou viskozitu, nebyla toxická a nezpůsobovala korozi či abrazi.

**Nádrž** Účelem nádrže je uchovávat chladicí kapalinu, která je pomocí čerpadla hnána přes chladicí okruh. Kromě toho se s její pomocí lze zbavovat bublin, které se nešťastnou náhodou dostanou do okruhu, neboť plyn má nižší hustotu než kapalina a má tendenci stoupat k vrchu nádoby. Zbavit se bublin v okruhu je nutné také proto, že svými tepelnými vlastnostmi negativně ovlivňují přenos tepla mezi blokem a chladicí kapalinu a také proto, že u některých typů průtokoměrů, např. turbínových, má přítomnost sekundární fáze vliv na nejistotu měření.

## 2.2 Užítá přístrojová technika

### 2.2.1 OMEGA turbínové průtokoměry FLR1000ST

Turbínové průtokoměry FLR1000ST od Omega Engineering Inc. jsou řadou snímačů pro měření malých průtoků kapalin s kinematickou viskozitou nižší než 10 cSt v rozsahu 10:1. Měronosnou veličinou je buď hodnota napětí analogového výstupu nebo hodnota frekvence obdélníkového signálu pulzního výstupu. Armatura průtokoměru je vyrobena z nerezové oceli, díky čemuž odolají vyššímu tlaku než modely řady FLR1000 užívající jako materiál acetal. Průtokoměr je pro jeho spolehlivou činnost nutné napájet stabilizovaným zdrojem napětí o hodnotě 12 V [16]. Pro tuto práci máme k dispozici průtokoměry FLR1007ST a FLR1009ST, viz obr. 2.3. Tab. 2.3 shrnuje důležité vlastnosti průtokoměrů řady FLR1000ST.

Rozsah	FLR1007ST: 13 až 100 ml·min <sup>-1</sup> FLR1009ST: 50 až 500 ml·min <sup>-1</sup>
Analogový výstup	0 až 5 V (vstupní impedance > 2,5 kΩ)
Pulzní výstup	7,5 V (0 až 400 Hz)
Přesnost a linearita	Analogový výstup: ±1,0 % FS Pulzní výstup: ±3,0 % FS
Opakovatelnost	±0,2 % FS
Jmenovitý tlak	3 450 kPa
Provozní teplota	5 až 55 °C
Napájení	12 V DC; 35 mA
Spolehlivost	100 000 h provozu

Tab. 2.3: Důležité vlastnosti turbínových průtokoměrů řady FLR1000ST [16]

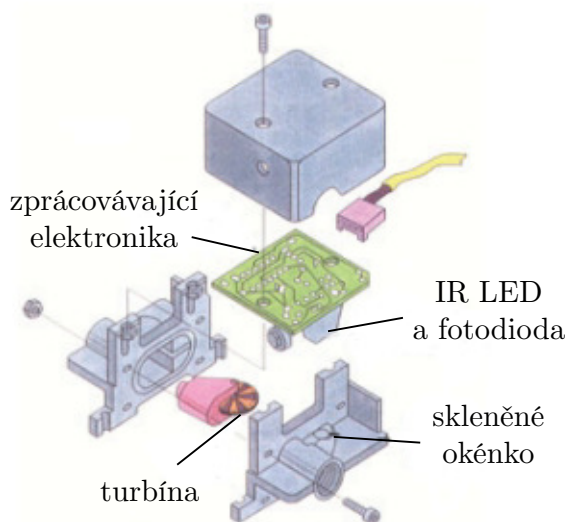


Obr. 2.3: Reálné provedení průtokoměrů řady OMEGA FLR1000ST

Průtok je měřen pomocí Peltonovy mikroturbíny. Jedná se o patentovanou konstrukci, která zaručuje vysokou linearitu výstupu, opakovatelnost a rychlou odezvu na změnu měřené veličiny, viz obr. 2.4. Precizně opracovaná tryska směřuje průtok vody



senzorem na velmi malé listy mikroturbíny, čímž dochází k otáčení jehož míra je úměrná rychlosti průtoku kapaliny. Na jedné straně mikroturbíny jsou rovnoměrně rozděleny černé a bílé části (kruhové výseče). Nad tím je umístěná infračervená LED dioda a fotodiody. Při otáčení mikroturbíny dochází tomu, že paprsek LED diody, který směřuje na jedno místo mikroturbíny se odrazí od bílých částí. Odražený paprsek je pak pomocí fotodiody transformován na elektrický impulz. Čím se mikroturbína otáčí rychleji, tím větší je frekvence detekovaných impulzů. Analogová elektronika pak zpracovává signál a přivádí jej na analogový a pulzní výstup [17].



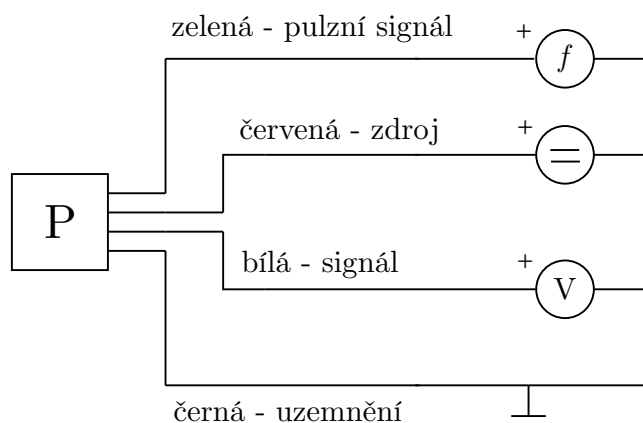
Obr. 2.4: Konstrukce turbínového průtokoměru OMEGA FLR1000ST [17] (upraveno)

Schéma zapojení průtokoměru do elektrického obvodu je na obr. 2.5. Průtokoměr obsahuje čtyři vývody navzájem odlišené barvami [17]:

- *napájecí* - červený, na něj se připojí zdroj 12 V stejnosměrného napětí;
- *analogový signál* - bílý, výstupní napětí je úměrné objemovému průtoku;
- *pulzní signál* - zelený, výstupní obdélníkový signál má kmitočet úměrný objemovému průtoku;
- *uzemnění* - černý, slouží k uzemnění obvodu.

### 2.2.2 Napájecí zdroj Diametral P230R51D

Pro napájení průtokoměru se použije robustní laboratorní zdroj P230R51D společnosti Diametral, viz obr. 2.6. Ten umožňuje napájení nezávislé napájení až dvou různých zařízení s plynulou regulací napětí do 30 V s omezením proudu od 0,1 do 4 A. Díky vestavěným snímačům lze sledovat na LCD displejích aktuální hodnoty napětí a proudu



Obr. 2.5: Schéma zapojení průtokoměrů FLR1000ST do elektrického obvodu

dodávané jednotlivými zdroji. Zařízení je vybaveno snímačem teploty a ventilátorem jako nutná prevence proti přehřátí [21].

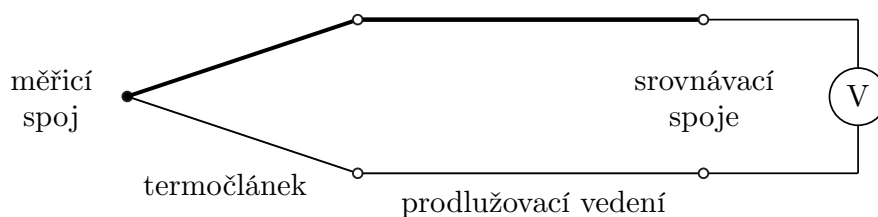


Obr. 2.6: Napájecí zdroj Diametral P230R51D

### 2.2.3 Termočlánky

Termočlánky jsou snímače teploty založené na termoelektrickém jevu. Schéma zapojení termočlánku je uvedené na obr. 2.7. Jedná se o dva drátky vyrobené z různých kovů nebo slitin, jejichž jeden konec tzv. *měřicí spoj* je pevně spojen a slouží k vlastnímu měření teploty. Na svorky druhého konce, *srovnávacích spojů*, je připojený voltmetr. Protože je napětí na termočlánku úměrné rozdílu teplot na měřicím a srovnávacím spoji, je nutné srovnávací spoj udržovat na stálé referenční teplotě buď pomocí termostatu nebo změny teploty kompenzovat pomocí elektrického obvodu s můstkem. Pro

zajištění dostatečné vzdálenosti místa vlastního měření a referenčních spojů se používá prodlužovací vedení zpravidla vyrobené ze stejných materiálů jako termočlánek [2].



Obr. 2.7: Schéma zapojení termočlánu

Typy termočlánu se označují velkým písmenem latinské abecedy a liší se navzájem použitými kombinacemi kovů a slitin, měřicím rozsahem, citlivostí a přesností měření. *Termočlánek typu K* použitý v této práci, patří mezi běžně používané termočlánu v praxi. Používá kombinaci slitin niklchrom a niklhlínik (NiCr-NiAl). Je určen pro měření teplot v maximálním rozsahu  $-200$  až  $1200$  °C. Toleranční třídy přesnosti dle normy ČSN EN 60584-1 ed. 2 jsou uvedeny v tab. 2.4 [2, 18].

Třída přesnosti	Rozsah
1	$\pm 1,5$ °C $-40$ až $375$ °C $\pm 0,4$ % AR $375$ až $1000$ °C
2	$\pm 2,5$ °C $-40$ až $333$ °C $\pm 0,75$ % AR $333$ až $1200$ °C
3	$\pm 2,5$ °C $-167$ až $40$ °C $\pm 1,5$ % AR $-200$ až $-167$ °C

Tab. 2.4: Normalizované toleranční třídy termočlánu typu K [18]

## 2.2.4 Čerpadlo Masterflex L/S

Masterflex L/S je řada peristaltických objemových čerpadel vyráběných společností Cole-Parmer. Pokrývají rozsah průtoků  $0,000$  až  $3\,400$  ml/min a jsou vhodné pro manipulaci s vysoce čistými i agresivními tekutinami o prakticky libovolné viskozitě. Lze je také použít pro dávkování tekutých surovin [19].

Čerpadlo se skládá ze tří hlavních částí, které lze velice snadno kombinovat a zaměnit za jiné podle aktuální potřeby:

- *pohonná jednotka,*
- *čerpací hlava,*
- *hadice.*

Rotor čerpací hlavy se spojí s pohonnou jednotkou, která zajišťuje jeho otáčení. Dvnitř čerpací hlavy se vloží pružná hadice, která se po uzavření hlavy utáhne tak, že otáčející se lopatky rotoru hadici střídavě stlačují a uvolňují a díky tomu dochází k posunu tekutiny uvnitř hadice jedním směrem [19].

Objemový průtok záleží jednak na počtu otáček rotoru za jednotku času, ale také na průměru zvolené hadice. Hadice se dále také volí s ohledem na teplotu a chemické vlastnosti protékané tekutiny. Volba čerpací hlavy ovlivňuje především přesnost objemových dávek poskytovaných čerpadel [19].

K dispozici máme čerpadlo Masterflex L/S Economy variable-speed drive s ručně regulovatelnou rychlostí 20 až 600 otáček za minutu a čerpací hlavou Masterflex L/S Easy Load 3, viz obr. 2.8.



Obr. 2.8: Čerpadlo Masterflex L/S

### 2.2.5 Magnetická míchačka Heidolph MR Hei-Tec

Tato magnetická míchačka Heidolph bude využita jako provizorní zdroj tepla neboť obsahuje termostat, který umožňuje regulovat teplotu na povrchu plotny míchačky. Maximální možná teplota plotny je 300 °C. Termostat se zapíná pouze tehdy, pokud teplota plotny poklesne pod určitou mez a vypíná pokud je dosaženo žádané teploty. Z tohoto důvodu se teplota plotny periodicky mění a s tím je nutné v experimentu počítat. Na obr. 2.9 je již starší model této míchačky, kterou máme k dispozici v laboratoři Mössbauerovy spektroskopie.



Obr. 2.9: Magnetická míchačka Heidolph MR Hei-Tec

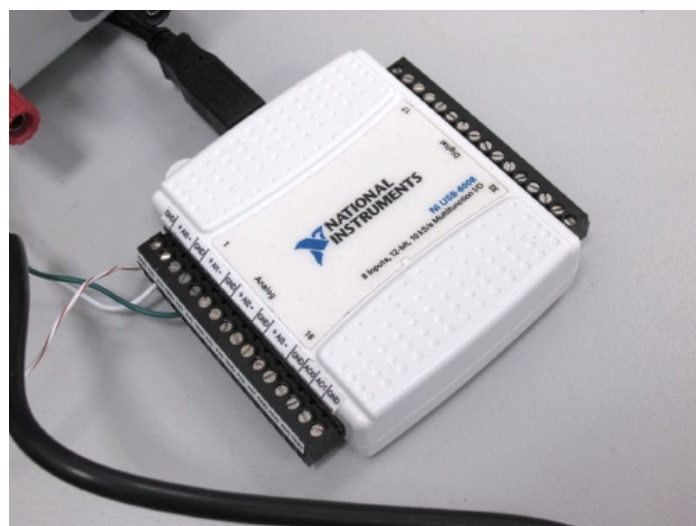
## 2.3 Sběr a zpracování naměřených dat

Snímače použité pro měření charakteristik chladicího okruhu neobsahují žádné zařízení pro indikaci okamžitých hodnot ani paměť pro ukládání naměřených dat. Poskytují však okamžitou hodnotu napětí úměrnou dané neelektrické veličině, jejíž hodnotu můžeme snímat pomocí měřicí karty nebo převodníku připojeného k počítači pomocí rozhraní. Takové sestavě se pak říká *virtuální měřicí přístroj*. Měřicí aplikace na počítači je nehmotnou částí virtuálního měřicího přístroje, zatímco měřicí karta a snímače, řízené touto aplikací představují jeho hmotnou část. Grafické uživatelské rozhraní aplikace, pak supluje funkci čelního panelu měřicího přístroje [20].

V naší práci použijeme pro sběr dat z průtokoměru měřicí kartu NI USB-6008, zatímco data z termočlánků budeme získávat pomocí převodníku NI USB-TC01. Software použitý pro indikaci, ukládání a zpracování dat byl vyvinut v grafickém programovacím prostředí NI LabVIEW 2013.

### 2.3.1 Měřicí karta NI USB-6008

NI USB-6008 je nízkorozpočtová měřicí karta vyvinutá společností National Instruments vhodná školní a nenáročné laboratorní experimenty, viz obr. 2.10. Jak již napovídá název, kartu lze k počítači připojit pomocí sériové sběrnice USB, což umožňuje kartu ovládat nejen ze stolních, ale i přenosných počítačů s podporou USB. Tvorba uživatelských aplikací v prostředí LabVIEW nebo v podporovaných programovacích jazycích (např. C++) je usnadněna díky podpoře přístrojových ovladačů NI-DAQmx. Karta obsahuje analogové vstupy pro měření, analogové výstupy pro generování signálu, digitální linky, čítač a podporuje digitální triggerování. Napájení karty je zajištěno přes sběrnici USB [22]. Základní vlastnosti karty shrnuje tab. 2.5.



Obr. 2.10: Měřicí karta NI USB-6008

### 2.3.2 Měřicí převodník NI USB-TC01

NI USB-TC01 je zařízení společnosti National Instruments pro převod signálu z termočláneku do digitální podoby a jeho přenos USB sběrnicí do počítače pro další zpracování. Na krabici převodníku je zdírka, ke které se připojuje termočlánek s miniaturním konektorem, viz obr. Podporuje všechny typy termočláneků v celém jejich standardním měřicím rozsahu s výjimkou typu E, kde napěťový rozsah analogového vstupu omezuje jeho využití do teploty 900 °C [23].



Obr. 2.11: Měřicí převodník NI USB-TC01 [23]

Vestavěná flash paměť obsahuje aplikaci pro okamžité použití umožňující záznam dat z termočláneku. Další aplikace pro převodník je možné vyvíjet s využitím přístrojových ovladačů NI-DAQmx [23]. Důležité parametry převodníku NI USB-TC01 jsou uvedeny v tab. 2.6.

Analogové vstupy	
Počet	8 (8 nesymetrických, 4 diferenciální)
A/D převodník	12-bit (s postupnou aproximací)
Vzorkovací frekvence	10 kHz
Rozsah	$\pm 10$ V (nesymetrický) $\pm 20$ V (diferenciální)
Vstupní impedance	144 k $\Omega$
Analogové výstupy	
Počet	2
D/A převodník	12-bit
Vzorkovací frekvence	150 Hz
Rozsah	0 až 5 V
Vstupní impedance	50 $\Omega$
Další	
Digitální linky	12 (TTL, LVTTTL, CMOS)
Čítače	1 (vzestupný; 32-bit; max. 5 MHz)
Trigger	digitální
Napájení	USB

Tab. 2.5: Parametry měřicí karty NI USB-6008 [22]

Typy termočlánků	J, K, R, S, T, N, B (v celém rozsahu) E (pouze do 900 °C)
Analogové vstupy	
Počet	1 (diferenciální)
A/D převodník	20-bit
Vzorkovací frekvence	4 Hz
Rozsah	$\pm 73,125$ mV
Vstupní impedance	20 M $\Omega$

Tab. 2.6: Parametry měřicího převodníku NI USB-TC01 [23]

### 2.3.3 Měřicí aplikace v LabVIEW

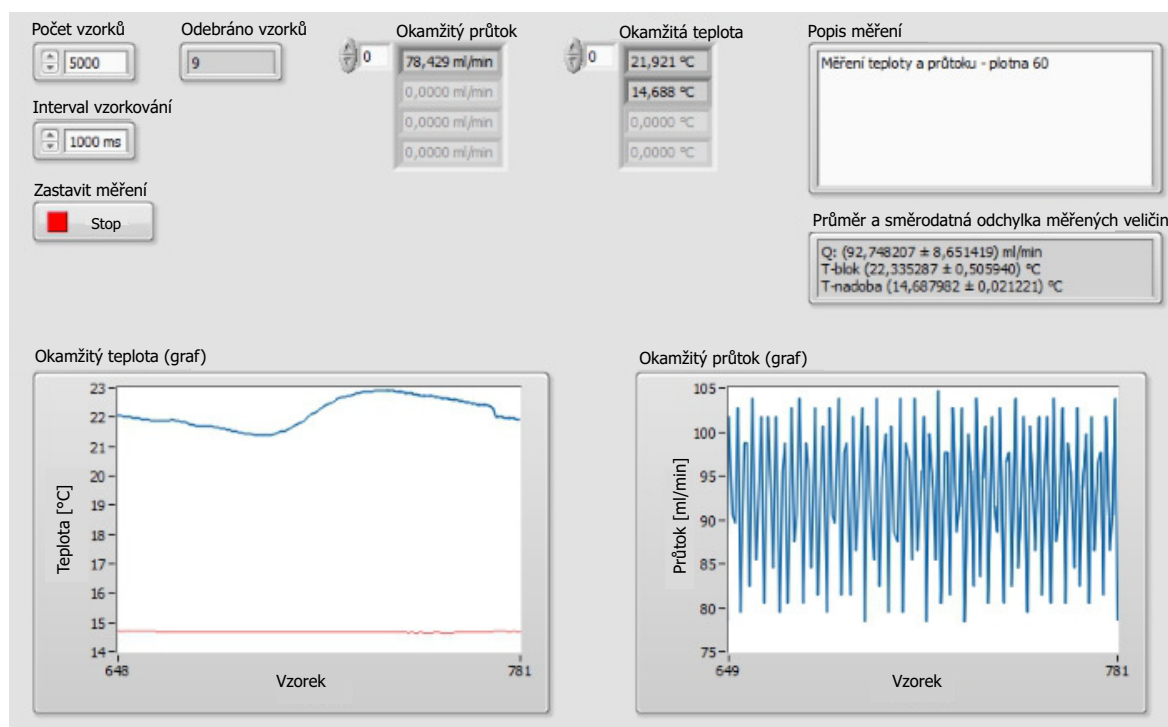
Měřicí aplikace `DAQ_chladici_okruh` pro indikaci a záznam okamžitých hodnot byla vyvinuta v grafickém vývojovém prostředí National Instruments LabVIEW 2013. LabVIEW představuje alternativu ke klasickým textovým programovacím jazykům. Vývojář zde místo psaní zdrojového kódu vytváří tzv. *virtuální přístroj* – soubor VI, skládající se ze dvou částí – *čelního panelu* a *blokového diagramu*.

Čelní panel slouží jako grafické uživatelské rozhraní, které je viditelné pro koncového uživatele. Ovládací prvky čelního panelu slouží k zadání vstupních dat, se kterými poté aplikace provádí akce definované programátorem v blokovém diagramu. Blokovaný diagram obsahuje uzly (funkce nebo podaplikace) zpracovávající data, které do nich tečou datovými cestami reprezentovanými vodiči v blokovém diagramu. Vodiče propojují jednotlivé uzly a definují tak směr toku dat neboli pořadí, ve kterém jednotlivé uzly data zpracovávají. Data tekoucí libovolným vodičem lze zobrazit indikátorem na čelním panelu. Charakter ovládacích prvků a indikátorů závisí na datovém typu, který

reprezentují. Např. ovládací prvek pro číselný vstup může vypadat jako numerické pole, posuvník nebo otočný knoflík, zatímco ovládací prvek pro typ bool jako obyčejný dvoustavový spínač. Mezi podporované datové typy patří celá čísla, čísla s plovoucí desetinnou čárkou, textové řetězce, pole, klastry – kontejnery obsahující jiné datové typy a mnoho dalších [24].

**DAQ\_chladici\_okruh** Aplikace DAQ\_chladici\_okruh obsahuje celkem 4 VI soubory, z nichž jeden (`main.vi`) slouží jako grafické uživatelské rozhraní a ostatní jako podpůrná VI pro zapouzdření funkcí a zjednodušení blokového diagramu hlavního VI.

Na obr. 2.12 je grafické uživatelské rozhraní celé aplikace. V pravém horním rohu jsou dva numerické ovladače, se kterými lze nastavit počet měřených vzorků a vzorkovací interval mezi nimi. Indikátor slouží ke kontrole, kolik je již odebráno vzorků. Nahoře uprostřed jsou pole indikátorů, které zobrazují okamžité hodnoty průtoku a teploty z použitých snímačů. Na grafech vespod lze sledovat jejich průběh v čase. V levém horním rohu lze do bílého textového pole doplnit popis měření. V šedém textovém poli se na konci měření zobrazí průměrné hodnoty a směrodatné odchylky průtoku a teplot ze snímačů.

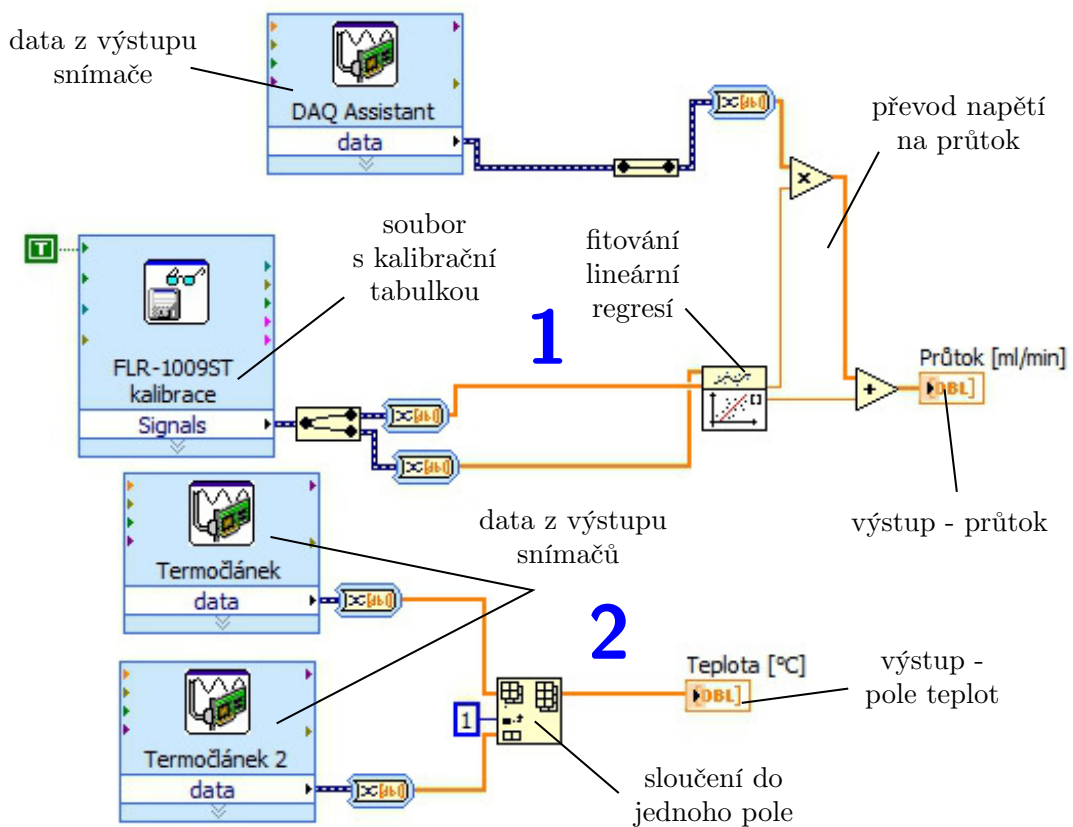


Obr. 2.12: Čelní panel aplikace DAQ\_chladici\_okruh

Zobrazované hodnoty průtoku závisí na použitém vztahu mezi napětím a objemovým průtokem daného průtokoměru. Jelikož měřicí karta snímá pouze hodnotu výstupního napětí z průtokoměru, je třeba provést převést napětí na objemový průtok podle tabulky z kalibračního listu. O to se stará VI `DeviceIO.vi`, viz obr 2.13. `DeviceIO.vi`

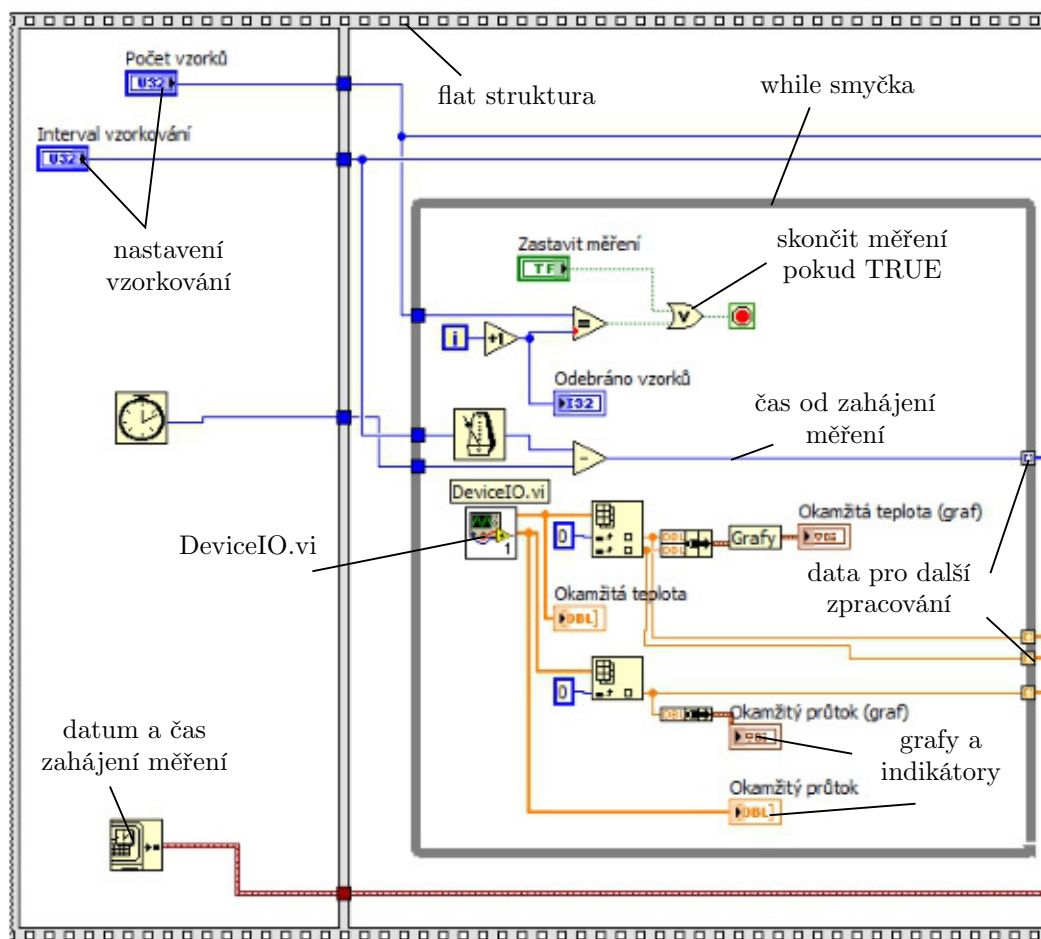


slouží k zapouzdření přístupu k jednotlivým DAQ zařízením. Horní částí blokového diagramu (1) obsahuje VI DAQ Assistant, který dodává okamžité hodnoty napětí z průtokoměru. Pod ním je VI pro načtení textového souboru s kalibrační tabulkou obsahující několik hodnot napětí a jim odpovídající hodnotu objemového průtoku. Z kalibrační tabulky se s použitím metody nejmenších čtverců získají koeficienty přímky s jejichž pomocí se převede napětí z průtokoměru na průtok a ten je jedním výstupem tohoto VI. Druhým výstupem je pak hodnota teploty z teplotních snímačů ve spodní části blokového diagramu (2).



Obr. 2.13: Blokový diagram DeviceI0.vi

Blokový diagram *main.vi* je blokovým diagramem čelního panelu aplikace. Ten obsahuje *flat strukturu* symbolizovanou fotografickým filmem. Ta vykonává veškeré úlohy v pořadí, jak jdou jednotlivé snímky filmu po sobě. V první části blokového diagramu se v prvním snímku vytvoří proměnné s počtem vzorků a vzorkovacím intervalem, které potřebujeme, abychom mohli taktovat odběr vzorků ve while smyčce s použitím DeviceI0.vi, viz obr. 2.14. Data ze vzorků se strádají do polí symbolizovaných malým čtverečkem na pravém boku while smyčky. While smyčka je přerušena teprve tehdy, když se odebere nastavený počet vzorků nebo když uživatel aplikace stiskne tlačítko stop na čelním panelu.

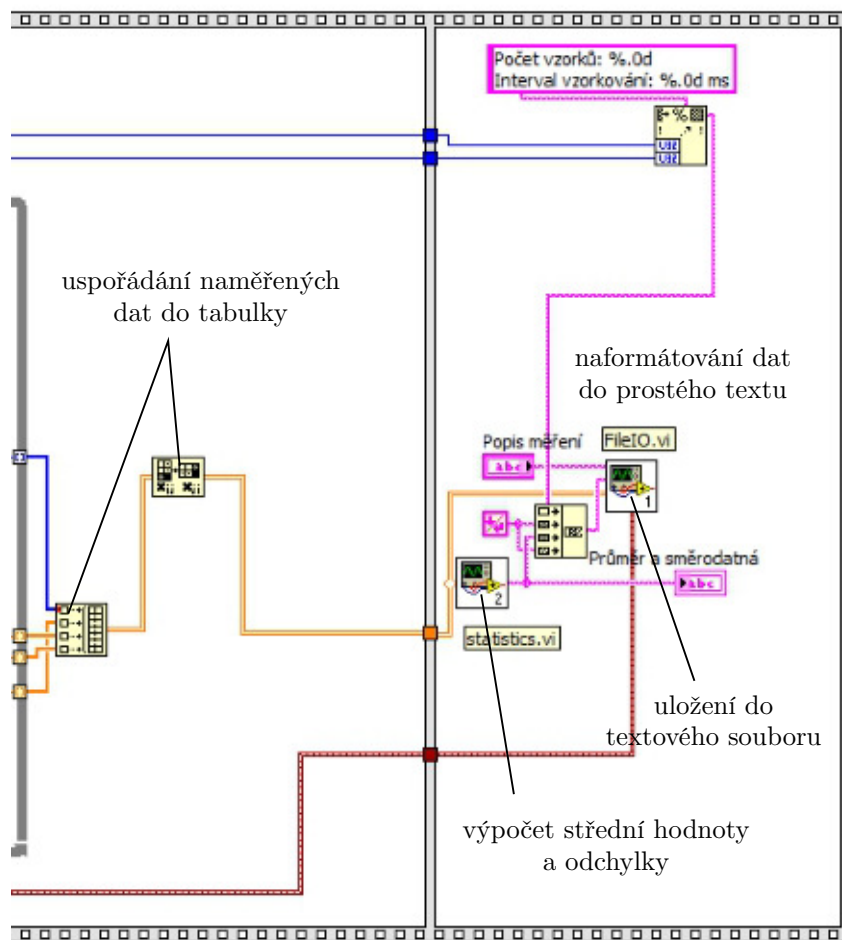


Obr. 2.14: Blokový diagram čelního panelu (1. část)

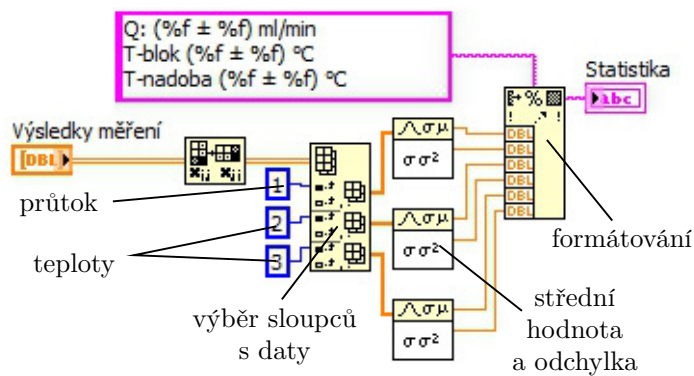
V druhé části na obr. 2.15 se data uložená do jednorozměrných polí, kde index pole odpovídá jednomu vzorku, spojí do tabulky (2D pole) a vypočítají se střední hodnoty a odchylky příslušných veličin. Nakonec se všechna dostupná data naformátují do prostého textu a uloží do textového souboru.

Soubor `statistics.vi` slouží k výpočtu střední hodnoty a směrodatné odchylky veličin z naměřených vzorků. Ty se pak naformátují do textového řetězce, který se pak zobrazí na indikátoru čelního panelu.

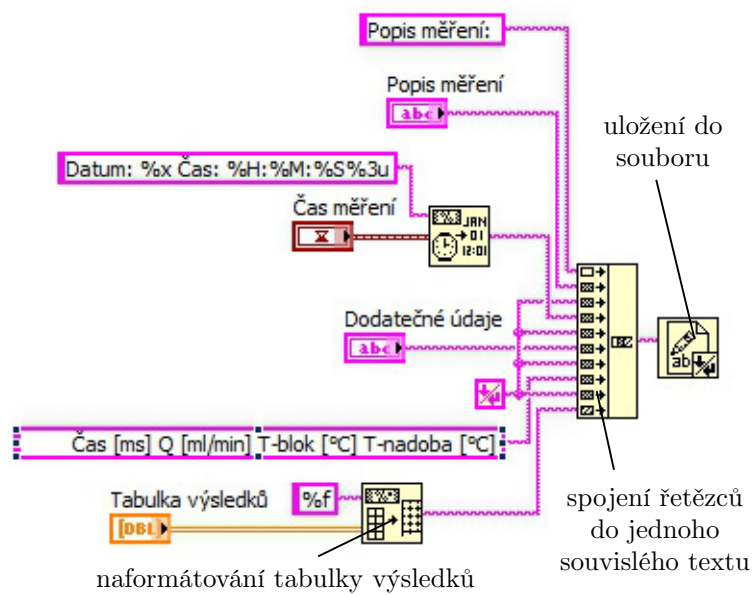
O sestavení textového souboru s naměřenými daty a jeho uložení na paměťové médium se stará `FileIO.vi`, viz obr. 2.17. Ukládání souboru je provedeno prostřednictvím dialogového okna, kde si uživatel může vybrat název i umístění souboru na paměťovém médiu.



Obr. 2.15: Blokový diagram čelního panelu (2. část)



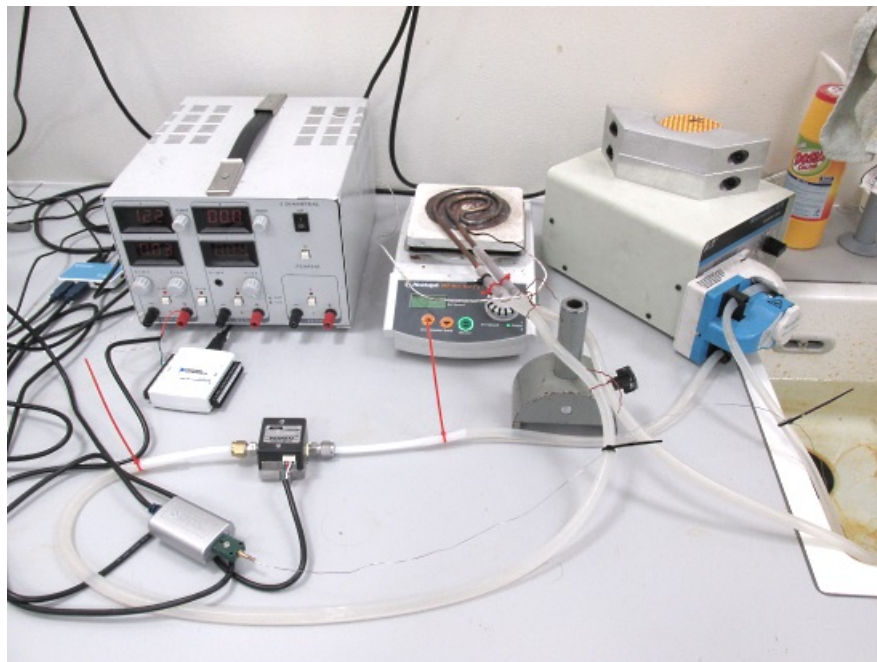
Obr. 2.16: Blokový diagram statistics.vi



Obr. 2.17: Blokový diagram FileIO.vi

## 2.4 Experimentální sestava

Na obr. 2.18 je experimentální provedení chladicího okruhu sestavené dle schématu na obr. 2.2. Na plotně nahoře uprostřed je usazen měděný chladicí blok, který má sloužit jako štít před teplem, které vyzařuje plotna. Na disku chladicího bloku je přivařená



Obr. 2.18: Experimentální provedení chladicího okruhu

měděná trubka o vnitřním průměru 4 mm, tloušťce 1 mm a celkové délce zhruba 74 cm, viz obr 2.19. Uvnitř disku je vyfrézován kruh, pro průchod gamma záření odraženého od měřeného vzuku. K vývodům bloku jsou připojené plastové hadičky pro přívod a



Obr. 2.19: Měděný chladicí blok

odvod chladicí kapaliny. Pro měření teploty na povrchu chladicího bloku je zde uchycen termočlánek typu K, viz obr. 2.20. Jako provizorní nádrž slouží dřez pod čerpadlem



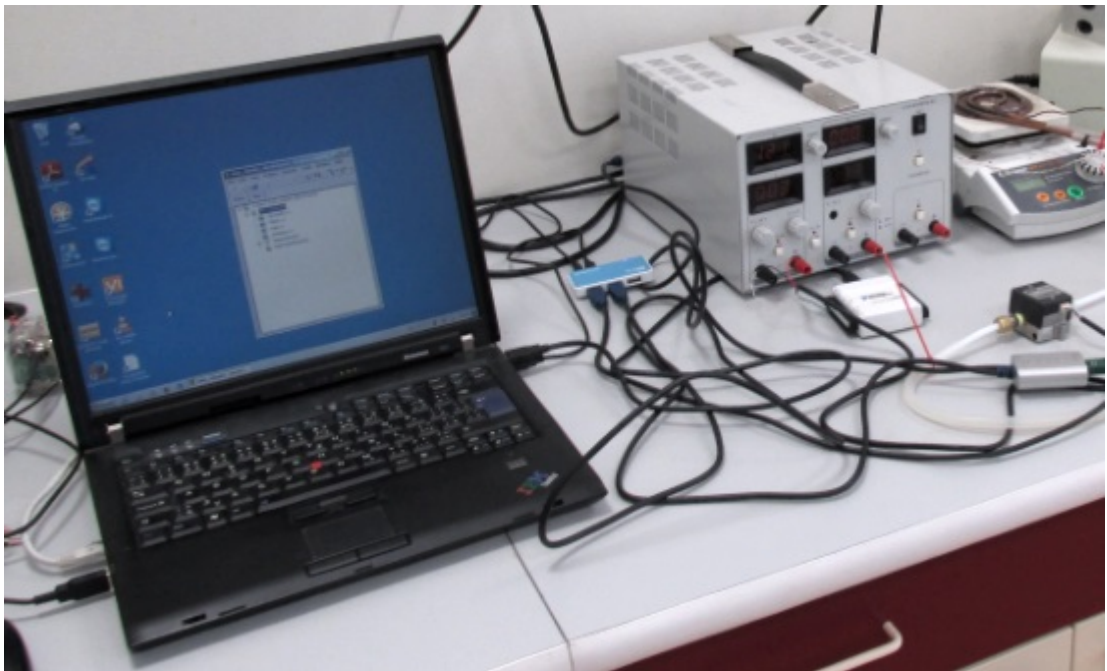
Obr. 2.20: Chladicí blok za provozu

napravo od plotny, viz obr. 2.21. Tenký drát ponořený do vody, je další termočlánek typu K, tento však měří teplotu vody v nádrži. Nalevo od plotny se nachází průtokoměr



Obr. 2.21: Čerpání vody z nádrže

FLR1009ST, měřicí karta NI USB-6008 a zdroj elektrického napětí pro průtokoměr, viz obr. 2.22. Signál ze všech snímačů se přenáší pro další zpracování přes rozhraní USB do přenosného počítače IBM, na kterém je nainstalován software National Instruments LabVIEW 2013.



Obr. 2.22: Elektronika pro zpracování dat

# Kapitola 3

## Shrnutí výsledků měření

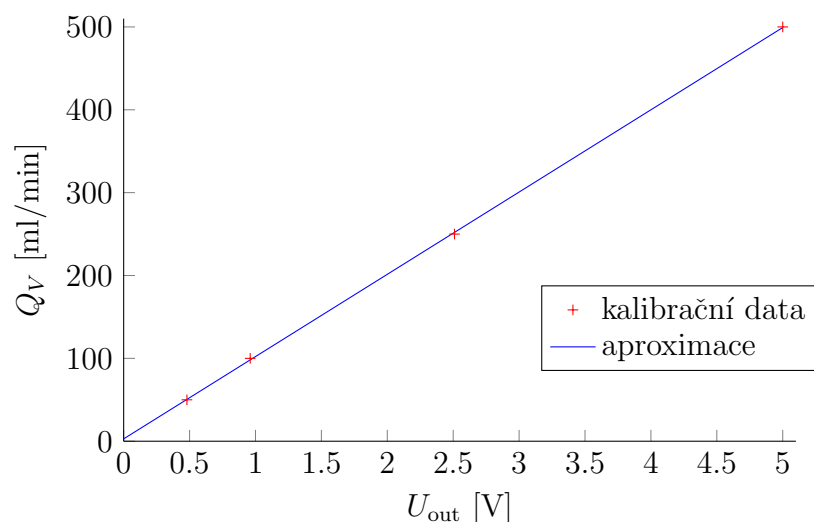
Měřili jsme závislost teploty plochy chladicího bloku na objemovém průtoku v chladicím okruhu. Pro měření teploty jsme použili termočlánek typu K a pro měření průtoku turbínový průtokoměr OMEGA FLR1009ST s rozsahem 50 až 500 ml/min. Pro převod napětí z výstupu průtokoměru na objemový průtok jsme použili údaje z výrobcem daného kalibračního listu. Kalibrace byla prováděna pro vodu při teplotě 72 °F (22,2 °C) a tlaku 740 torr (986,6 hPa). Výsledky kalibrace jsou uvedeny v tab. 3.1.  $Q_V$  je kalibrační hodnota objemového průtoku,  $U_{\text{out}}$  napětí na výstupu průtokoměru a  $\epsilon$  je odchylka od ideální hodnoty napětí v procentech celého rozsahu napětí, který činí 5 V.

$Q_V$ [ml/min]	$U_{\text{out}}$ [V]	$\epsilon$ [% FS (5 V)]
500	5,00	0,0
250	2,51	+0,2
100	0,96	-0,8
50	0,48	-0,4

Tab. 3.1: Kalibrační tabulka průtokoměru FLR1009ST

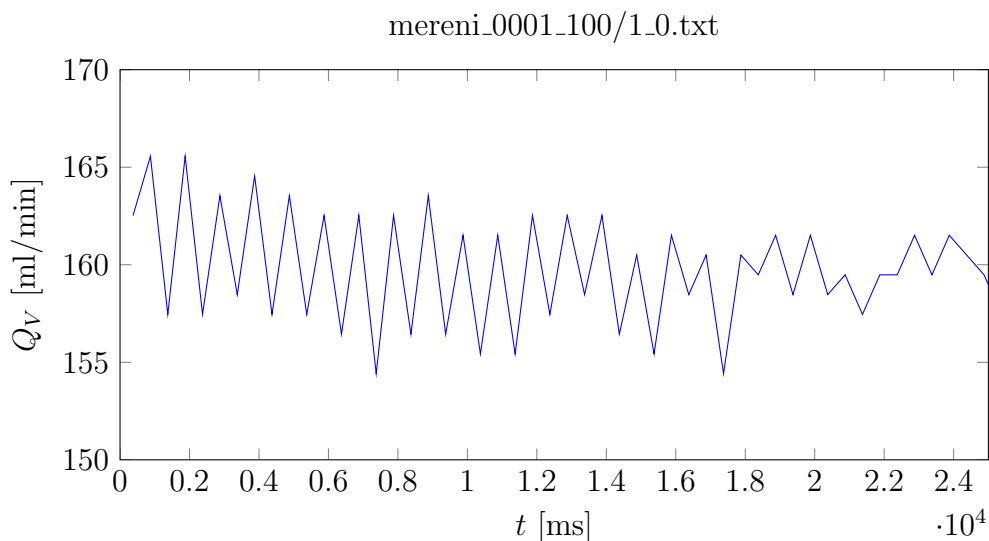
Hodnotám, které jsou v kalibrační tabulce, odpovídá kalibrační přímka se směrnicí  $a = 99,284$  a úsekem  $b = 2,85208$ , viz obr. 3.1.



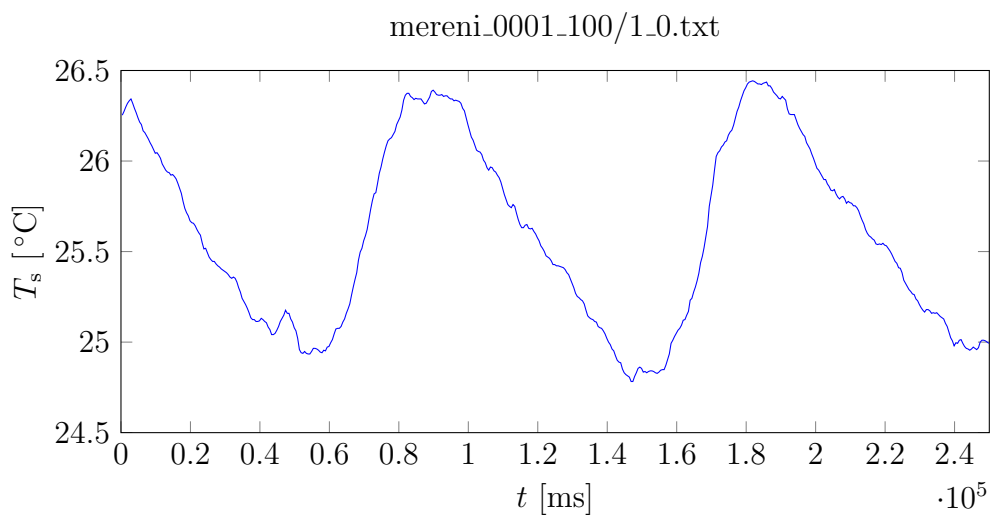


Obr. 3.1: Kalibrační přímka průtokoměru FLR1009ST

Při měření se hodnota průtoku  $Q_V$  periodicky mění, viz obr. 3.2. Důvodem tohoto jevu je, že peristaltické čerpadlo čerpá tekutinu po diskretních dávkách. Periodicky se také mění hodnota teplota chladicího bloku na vnější straně  $T_s$ , za což je zodpovědná magnetická míchačka, která se při nižší teplotě povrchu plotny zapne a v okamžiku, kdy teplota odpovídá té nastavené, se vypne, viz obr. 3.3. Z výše uvedených důvodů aplikace jako výsledek poskytuje nejen řadu okamžitých hodnot průtoku a teploty, ale také střední hodnotu a směrodatnou odchylku daných veličin v rámci jednoho měření, které lépe charakterizují měřenou soustavu.



Obr. 3.2: Periodický průběh průtoku v chladicím okruhu



Obr. 3.3: Periodický průběh teploty na povrchu chladičho bloku

Provedli jsme celkem pět měření v laboratoři Mössbauerovy spektroskopie v RCTPM Olomouc. V každém měření jsme v rámci možností daných fyzikálními vlastnostmi vody (těkavost) a měřicím rozsahem průtokoměru (malé průtoky obtížně měřitelné, velké mohou poškodit snímač) změřili teplotu pro pět různých hodnot objemového průtoku nastavených otočným knoflíkem na čerpadle (stupně 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5) a pro tři různé teploty nastavené na plotně - magnetické míchačce (100, 200 a 300 °C). Teplota při nulovém průtoku nebyla měřena kvůli možnému varu vody uvnitř okruhu. U velmi nízkých průtoků zase docházelo ke tvorbě bublin, které snižují účinnost chlazení a zásadně zvyšují nejistotu měření průtoku.

V příloze 1 a 2 jsou výsledky měření:

- *Měření č.1* - 24. 6. 2014, od 100 do 300 °C, viz tab. A a obr. A;
- *Měření č.2* - 24. 6. 2014, pozpátku od 300 do 100 °C, viz tab. B a obr. B;
- *Měření č.3* - 25. 6. 2014, od 100 do 300 °C, viz tab. C a obr. C;
- *Měření č.4* - 25. 6. 2014, pozpátku od 300 do 100 °C, viz tab. D a obr. D;
- *Měření č.5* - 25. 6. 2014, od 100 do 300 °C, viz tab. E. a obr. E.

Časové průběhy jednotlivých bodů jsou uloženy na přiloženém disku (viz příloha 3) v podadresářích jednotlivých měření adresáře `mereni`.

Dále byla vytvořena průměrováním hodnot veličin každého jednoho bodu z pěti výše uvedených měření průměrná charakteristika pro teploty na povrchu plotny 100, 200 a 300 °C, viz tab. 3.2. Nejistota určení veličiny pro daný bod byla vzata z toho měření, které ji mělo největší. Z těchto výsledků byl pak sestaven graf na obr. 3.4. Černé body jsou výsledky měření z tab. 3.2, svislé čáry pak intervaly jejich nejistot. Jako nejlepší se ukázalo tyto body proložit součtem dvou exponenciálních funkcí s koeficienty  $a, b, c$  a  $d$ . Tedy

$$T_s = a \exp(bQ_V) + c \exp(dQ_V) \quad (3.1)$$

Jednotlivé koeficienty získané fitováním výsledků v programu MATLAB podle funkce 3 společně s 95% intervalem spolehlivosti jsou uvedené v tab. 3.3.

Pro měření jsme také měřili průměrnou teplotu vody v chladicím okruhu  $T_v$ . Z tabulek v příloze 2 je možno vidět, že nejmenší teplota vody v rámci všech měření byla 13,27 °C (viz tab. C) a největší 25,3 °C. Výrobce průtokoměru OMEGA FLR1009ST na svých webových stránkách uvádí, že citlivost na změnu teploty je menší než  $\pm 0,2$  % FS nebo  $\pm 1$  ml/min. Proto byla tato skutečnost při měření považována za zanedbatelnou.

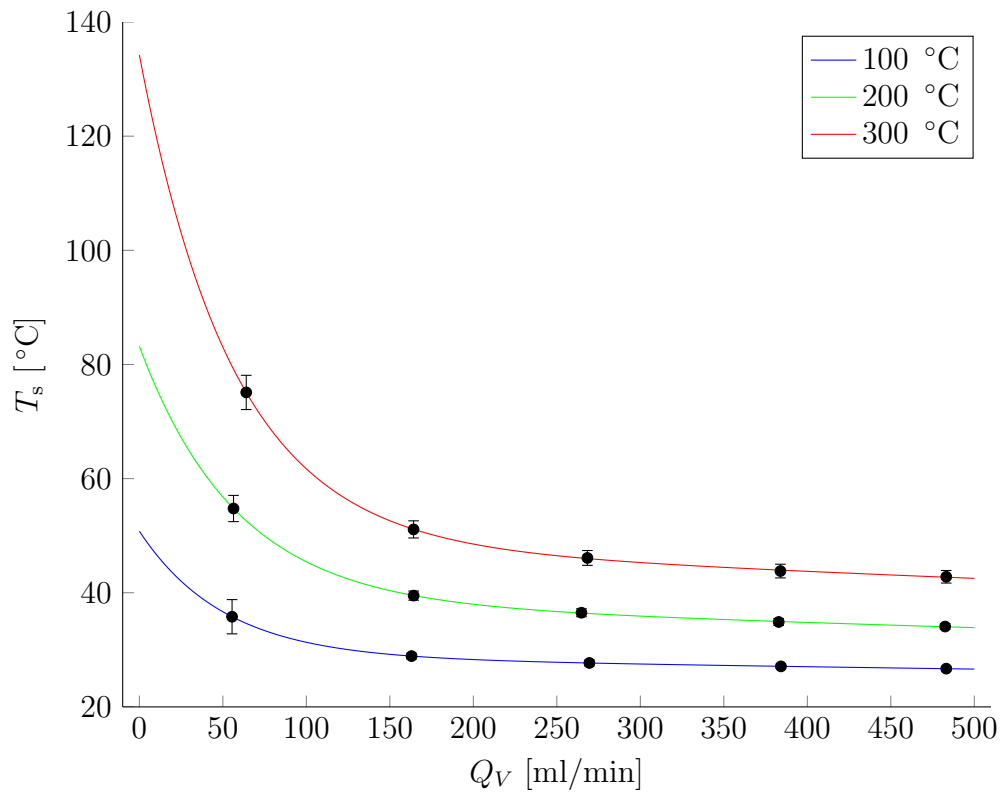
$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]
Teplota plotny 100 °C	
55,5 ± 6,2	35,8 ± 3,0
163,0 ± 2,9	28,9 ± 0,5
269,5 ± 3,8	27,7 ± 0,5
384,2 ± 3,0	27,1 ± 0,4
483,2 ± 5,1	26,7 ± 0,4
Teplota plotny 200 °C	
56,4 ± 6,3	54,8 ± 2,3
164,3 ± 2,7	39,5 ± 0,8
264,8 ± 3,9	36,5 ± 0,7
382,9 ± 4,3	34,9 ± 0,6
482,5 ± 2,8	34,1 ± 0,5
Teplota plotny 300 °C	
64,0 ± 8,1	75,1 ± 3,0
164,2 ± 7,6	51,1 ± 1,5
268,3 ± 3,8	46,1 ± 1,3
383,9 ± 3,0	43,8 ± 1,2
483,2 ± 4,5	42,8 ± 1,1

Tab. 3.2: Výsledná charakteristika chladicího okruhu

Jelikož má kanálek chladicího bloku průměr 4 mm, pohybuje se Reynoldsovo číslo mezi hodnotami 263 až 2631 v rozsahu 50 až 500 ml/min, při teplotě vody 20 °C s kritickým  $Re_{krit} = 2320$  kolem 440 ml/min. To znamená, že je proudění v kanálku chladicího bloku laminární v rozsahu 0 až 440 ml/min a v přechodové oblasti mezi laminárním a turbulentním ve zbytku měřicího rozsahu průtokoměru. Nevýhodou laminárního proudění je, že se teplo v tekutině šíří pouze vedením, čímž výrazně snižuje účinnost chlazení, kterého je dosahováno při turbulentním proudění mísením vrstev tekutiny. Zvyšování rychlosti v tomto ohledu má vliv na to, že ohřátý element tekutiny, který je ve styku s horkou mědí je rychleji nahrazen chladnějším a tím pádem nedochází k výraznému hromadění energie tepelného pohybu a tím i zvyšování teploty v chladicím bloku. Hodnota 440 ml/min je vypočtena dle vzorce 1.1.2 a platí pouze pro ideální kruhové potrubí a čistou vodu.

koeficient	hodnota	95 % CI
Teplota plotny 100 °C		
<i>a</i>	22,02	(16,74, 27,30)
<i>b</i>	-0,01994	(-0,02579, -0,01408)
<i>c</i>	28,76	(27,88, 29,65)
<i>d</i>	-0,0001548	(-0,00022920, -0,00008033)
Teplota plotny 200 °C		
<i>a</i>	44.84	(24.06, 65.62)
<i>b</i>	-0.01736	(-0.03027, -0.004448)
<i>c</i>	38.51	(32.11, 44.91)
<i>d</i>	-0.0002549	(-0.0006479, 0.0001381)
Teplota plotny 300 °C		
<i>a</i>	85.5	(28.5, 142.5)
<i>b</i>	-0.01789	(-0.03322, -0.002555)
<i>c</i>	48.73	(36.15, 61.31)
<i>d</i>	-0.0002732	(-0.0008862, 0.0003398)

Tab. 3.3: Koeficienty získané aproximací naměřených dat součtem dvou exponenciálních funkcí v MATLABu



Obr. 3.4: Graf výsledné charakteristiky chladicího okruhu

# Závěr

Cílem práce bylo získat představu o tom, zda je možné vybudovat regulovatelný chladicí okruh pro měřicí celou Mössbauerovu spektrometru. V experimentu se nám podařilo získat závislost teploty vnější strany chladicího bloku na objemovém průtoku. Potýkali jsme se však s několika problémy. Prvním bylo, že jsme netušili jaký je vhodný rozsah průtoků pro chlazení. Experiment však ukázal, že bez ohledu na teplotu, na kterou je zahříván povrch plotny magnetického míchače, dochází v oblasti nad 400 ml/min objemového průtoku ke snížení teploty vnější plochy chladicího bloku na přijatelnou mez. To může být způsobeno přechodem laminárního proudění na turbulentní v oblasti kolem 400 ml/min. Pro konečné závěry však bude nutné změřit průtoky nad 500 ml/min, což bude zřejmě vyžadovat pořízení průtokoměru s větším relativním rozsahem.

Dalším problémem je, že máme k dispozici pouze ručně ovladatelné čerpadlo a tím je znemožněno přesné nastavení průtoku i zapojení do automatizovaného regulačního obvodu. Pro tento účel bude nutné pořídit čerpadlo řízené pomocí přístrojového rozhraní.

Výsledná charakteristika experimentu platí pouze pro teploty na vnitřní straně chladicího bloku od 100 do 300 °C, protože magnetická míchačka, kterou jsme použili jako zdroj tepla, není konstruována pro teploty vyšší než 300 °C. Navíc byl experiment prováděn v otevřeném prostoru laboratoře Mössbauerovy spektroskopie. Pro zlepšení kvality experimentu bude proto nutné vytvořit věrný model měřicí cely obsahující termostat s možností plynulé regulace teploty alespoň do 1000 °C a umístit model do prostoru s kontrolovanými fyzikálními podmínkami.

# Seznam použité literatury

- [1] BAJER, J. *Mechanika 3*. Olomouc: Vydavatelství UP, 2006. ISBN 80-244-1293-4.
- [2] JENČÍK, J., J. VOLF. *Technická měření*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02138-6.
- [3] ĎAĎO, S., L. BEJČEK a A. PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-156-X.
- [4] ČMELÍK, M., M. MACHONSKÝ a Z. ŠÍMA. *Fyzikální tabulky*. Liberec: TU Liberec, 2001. ISBN 80-7083-511-X.
- [5] MIKULČÁK, J. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-345-5.
- [6] WELANDER, P. Výběr průtokoměru: Vhodná kapacita a provedení. *Control Engineering Česko*. 2010, **2010**(2). ISSN 1896-5784. Dostupné též z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/vyber-prutokomeru-vhodna-kapacita-a-provedeni/>
- [7] KADLEC, K. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1). *Automa*. 2006, **2006**(10), 5-9. ISSN 1210-9592.
- [8] ORLÍKOVÁ, S. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue*. 2001, **2001**(49). ISSN 1213-1539. Dostupné též z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html>
- [9] VOJÁČEK, A. *Zajímavé principy měření - Elektromagnetické (indukční) průtokoměry* [online]. Praha: HW server, aktualizováno 8. 8. 2009 [vid. 2014-07-20]. ISSN 1803-6392. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/zajimave-principy-mereni-elektromagneticke-indukcni-prutokomery>
- [10] *Úvod do ultrazvukových průtokoměrů* [online]. OMEGA Engineering [vid. 2014-07-21]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/UltrasonicFlowmeters.html>

- [11] KADLEC, K. Coriolisovy průtokoměry. *Automa*. 2010, **2010**(11), 40-42. ISSN 1210-9592.
- [12] SCHMIDT, H. Měření průtoku v potravinářství. *Automa*. 2010, **2010**(8-9), 40-42. ISSN 1210-9592.
- [13] LIDE, D. R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-0485-7.
- [14] NEUŽIL, L., V. MÍKA. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1998. ISBN 80-7080-312-6.
- [15] *Fyzikální hodnoty pro suchý vzduch při tlaku 100 kPa* [online]. TZB-info [vid. 2014-07-22]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/38-fyzikalni-hodnoty-pro-suchy-vzduch-pri-tlaku-100-kpa>
- [16] *Air/Water Flow Sensors With 0 to 5 Vdc Output* [online]. OMEGA Engineering [vid. 2014-07-22]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/shop/subsectionSC.asp?subsection=F06&book=Green>
- [17] OMEGA ENGINEERING. *FLR1000, 1000BR, 1000ST Series - Flow Sensors & Meters for Liquids*. Stamford: Omega Engineering, 2005.
- [18] ČSN EN 60584-1 ed. 2. *Termoelektrické články - Část 1: Údaje napětí a tolerance*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [19] *Řada Masterflex L/S* [online]. Fiedler Scientific Instruments [vid. 2014-07-23]. Dostupné z: <http://www.pristroje.cz/masterflex/ls.htm>
- [20] PECHOUŠEK, J., M. VŮJTEK, P. NOVÁK, J. NAVARŤÍK, J. FRYDRYCH. *Číslíkové měřicí systémy pro aplikovanou fyziku*. Olomouc: Vydavatelství UP, 2012. ISBN 978-80-244-3136-9.
- [21] *Laboratorní zdroj P230R51D 2x 0÷30V/4A; 1x 5V/3A* [online]. Diametral [vid. 2014-07-23]. Dostupné z: <http://www.diametral.cz/ac-dc-zdroje/dc-regulovatelne-zdroje/laboratorni/laboratorni-zdroj-p230r51d-2x-030v/4a-1x-5v/3a.html>
- [22] *Low-Cost, Bus-Powered Multifunction DAQ for USB* [online]. National Instruments [vid. 2014-07-23]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/cs>
- [23] *NI USB-TC01* [online]. National Instruments [vid. 2014-07-23]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-215/lang/cs>



- [24] HAVLÍČEK, J., J. VLACH, M. VLACH, V. VLACHOVÁ. *Začínáme s LabVIEW*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-245-9.

# Seznam obrázků

1.1	Rovnice kontinuity . . . . .	11
1.2	Bernoulliho rovnice [1] (upraveno) . . . . .	11
1.3	Viskozita . . . . .	12
1.4	Proudění a) laminární, b) turbulentní . . . . .	13
1.5	Karmanova vírová stezka [3] (upraveno) . . . . .	14
1.6	Oválný průtokoměr: a) princip, b) konstrukce [3] (upraveno) . . . . .	18
1.7	Oválný průtokoměr s hladkými okraji [3] . . . . .	18
1.8	Tělesový (piškotový) průtokoměr [3] . . . . .	19
1.9	Princip fungování Pitotovy trubice [2] (upraveno) . . . . .	20
1.10	Pitotova trubice a) s dvojitou stěnou, b) víceotvorová [3] (upraveno) . . . . .	21
1.11	Princip fungování Prandtlovy trubice [3] (upraveno) . . . . .	21
1.12	Rozdělení statického tlaku v okolí škrťacího členu . . . . .	22
1.13	Průtokový součinitel $C$ pro různé škrťací členy a jeho závislost na Reynoldsově čísle [3] . . . . .	22
1.14	Závislost trvalé tlakové ztráty $p_z$ na poměrném zúžení $\beta$ . . . . .	23
1.15	Prostorová konfigurace průtočného potrubí, manometru a impulsního potrubí u a) kapalin, b) plynů a c) par [2] . . . . .	23
1.16	Umístění clony v měřicím potrubí [3] (upraveno) . . . . .	24
1.17	Druhy clon . . . . .	24
1.18	Normalizovaná dýza ASME [3] (upraveno) . . . . .	25
1.19	Venturiho trubice [3] (upraveno) . . . . .	26
1.20	Princip fungování rotametru . . . . .	26
1.21	Schéma turbínového průtokoměru [3] . . . . .	28

1.22	Princip fungování vírového průtokoměru . . . . .	29
1.23	Měření průtoku vodivé kapaliny elektromagnetickým průtokoměrem . . . . .	30
1.24	Přímý ultrazvukový průtokoměr . . . . .	31
1.25	Příložný dopplerovský průtokoměr . . . . .	32
1.26	Coriolisův průtokoměr s U trubicí [3] (upraveno) . . . . .	33
1.27	Coriolisův průtokoměr s přímou trubicí . . . . .	34
1.28	Princip tepelného průtokoměru [2] (upraveno) . . . . .	35
2.1	Mössbauerův spektrometr s měřicí celou . . . . .	37
2.2	Schéma chladicího okruhu pro celu Mössbauerova spektrometru . . . . .	38
2.3	Reálné provedení průtokoměrů řady OMEGA FLR1000ST . . . . .	40
2.4	Konstrukce turbínového průtokoměru OMEGA FLR1000ST [17] (upraveno) . . . . .	41
2.5	Schéma zapojení průtokoměrů FLR1000ST do elektrického obvodu . . . . .	42
2.6	Napájecí zdroj Diametral P230R51D . . . . .	42
2.7	Schéma zapojení termočlánku . . . . .	43
2.8	Čerpadlo Masterflex L/S . . . . .	44
2.9	Magnetická míchačka Heidolph MR Hei-Tec . . . . .	45
2.10	Měřicí karta NI USB-6008 . . . . .	46
2.11	Měřicí převodník NI USB-TC01 [23] . . . . .	46
2.12	Čelní panel aplikace DAQ_chladici_okruh . . . . .	48
2.13	Blokový diagram DeviceIO.vi . . . . .	49
2.14	Blokový diagram čelního panelu (1. část) . . . . .	50
2.15	Blokový diagram čelního panelu (2. část) . . . . .	51
2.16	Blokový diagram statistics.vi . . . . .	51
2.17	Blokový diagram FileIO.vi . . . . .	52
2.18	Experimentální provedení chladicího okruhu . . . . .	53
2.19	Měděný chladicí blok . . . . .	53
2.20	Chladicí blok za provozu . . . . .	54
2.21	Čerpání vody z nádrže . . . . .	54

2.22	Elektronika pro zpracování dat . . . . .	55
3.1	Kalibrační přímka průtokoměru FLR1009ST . . . . .	57
3.2	Periodický průběh průtoku v chladicím okruhu . . . . .	57
3.3	Periodický průběh teploty na povrchu chladicího bloku . . . . .	58
3.4	Graf výsledné charakteristiky chladicího okruhu . . . . .	61

# Seznam tabulek

1.1	Dynamická viskozita různých tekutin . . . . .	13
1.2	Typické metrologické vlastnosti a využití průtokoměrů [7] . . . . .	36
2.1	Součinitel tepelné vodivosti některých kovů a slitin . . . . .	39
2.2	Srovnání parametrů chladicích médií . . . . .	39
2.3	Důležité vlastnosti turbínových průtokoměrů řady FLR1000ST [16] . . . . .	40
2.4	Normalizované toleranční třídy termočlánku typu K [18] . . . . .	43
2.5	Parametry měřicí karty NI USB-6008 [22] . . . . .	47
2.6	Parametry měřicího převodníku NI USB-TC01 [23] . . . . .	47
3.1	Kalibrační tabulka průtokoměru FLR1009ST . . . . .	56
3.2	Výsledná charakteristika chladicího okruhu . . . . .	60
3.3	Koeficienty získané aproximací naměřených dat součtem dvou exponenciálních funkcí v MATLABu . . . . .	61

# Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	analogově digitální
AR	ze čteného údaje (Actual Reading)
$c$ [ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	měrná tepelná kapacita
CI	interval spolehlivosti (Confidence Interval)
cP	centipoise; jednotka dynamické viskozity ( $1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )
cSt	centistokes; jednotka kinematické viskozity ( $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )
$D$ [m]	světlost (průměr) potrubí
D/A	digitálně analogový
DAQ	sběr dat (Data Acquisition)
DC	stejnoseměrné napětí nebo proud (Direct Current)
$f$ [Hz]	frekvence
FS	z celého rozsahu (Full Scale)
$h$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	součinitel prostupu tepla
$p_c$ [Pa]	celkový tlak
$p_d$ [Pa]	dynamický tlak
$p_{\max}$ [Pa]	jmenovitý (maximální) tlak
$p_s$ [Pa]	statický tlak
$p_z$ [Pa]	tlaková ztráta
$\dot{q}$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]	hustota tepelného toku
$Q$ [J]	teplo
$\dot{Q}$ [W]	tepelný tok
$Q_m$ [ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	hmotnostní průtok
$Q_{\max}$	maximální průtok v měřicím rozsahu
$Q_{\min}$	minimální průtok v měřicím rozsahu
$Q_V$ [ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ]	objemový průtok
Re [-]	Reynoldsovo číslo
St [-]	Strouhalovo číslo
$T_s$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	teplota na vnější straně chladičho bloku

$T_v$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	teplota vody v chladičím okruhu
TR	poměr $Q_{\max}/Q_{\min}$ (Turndown Ratio)
USB	univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
$v$ [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	rychlost
VI	virtuální přístroj (Virtual Instrument)
VI	zdrojový soubor LabVIEW
$\eta$ [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]	dynamická viskozita
$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	součinitel tepelné vodivosti
$\nu$ [ $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ]	kinematická viskozita
$\rho$ [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	hustota

# Seznam příloh

## Příloha 1: Tabulky výsledků jednotlivých měření

- $Q_V$  střední hodnota měřeného objemového průtoku  
 $T_s$  střední hodnota teploty na vnější straně chladicího bloku  
 $T_v$  střední hodnota teploty vody v chladicím okruhu během jednoho cyklu měření  
 $\sigma_{Q_V}$  směrodatná odchylka  $Q_V$   
 $\sigma_{T_s}$  směrodatná odchylka  $T_s$   
 $\sigma_{T_v}$  směrodatná odchylka  $T_v$

$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]	$T_v$ [°C]	$\sigma_{Q_V}$ [ml/min]	$\sigma_{T_s}$ [°C]	$\sigma_{T_v}$ [°C]
Teplota plotny 100 °C					
51,4	37,3	13,337	6,0	3,0	0,005
160,3	25,6	13,49	2,9	0,5	0,05
266,6	24,3	13,7	3,8	0,5	0,1
375,5	23,3	13,96	2,9	0,4	0,03
476,3	22,4	14,07	5,1	0,4	0,04
Teplota plotny 200 °C					
57,0	54,1	14,15	6,1	1,2	0,01
161,4	39,0	15,0	1,6	0,8	0,2
265,2	36,2	15,6	3,9	0,7	0,1
377,3	34,4	16,07	4,3	0,6	0,08
477,6	31,9	16,8	2,5	0,5	0,1
Teplota plotny 300 °C					
68,5	73,2	17,4	7,2	2,4	0,1
165,7	52,5	18,1	2,4	1,5	0,3
266,3	48,2	19,6	3,8	1,3	0,2
379,6	45,9	20,3	2,9	1,2	0,1
481,6	44,0	21,1	2,6	1,1	0,1

Tab. A: Měření č. 1



$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]	$T_v$ [°C]	$\sigma_{Q_V}$ [ml/min]	$\sigma_{T_s}$ [°C]	$\sigma_{T_v}$ [°C]
Teplota plotny 100 °C					
58,1	37,2	24,68	5,9	0,5	0,08
162,1	32,2	24,27	2,4	0,4	0,08
270,3	31,0	23,91	3,5	0,3	0,05
388,8	30,6	23,96	2,8	0,4	0,07
482,5	30,5	24,16	3,4	0,4	0,04
Teplota plotny 200 °C					
55,2	56,6	23,91	5,7	1,1	0,04
161,9	42,3	23,87	2,7	0,7	0,06
263,6	39,2	24,06	3,8	0,6	0,09
385,2	37,4	24,12	2,9	0,5	0,06
482,4	36,7	24,6	2,8	0,5	0,1
Teplota plotny 300 °C					
64,0	77,1	20,84	6,4	3,0	0,05
161,9	53,5	21,9	2,5	1,4	0,2
265,7	48,6	22,8	3,7	1,2	0,2
382,8	46,1	23,7	2,8	1,1	0,1
475,7	44,7	24,1	2,6	1,0	0,1

Tab. B: Měření č. 2

$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]	$T_v$ [°C]	$\sigma_{Q_V}$ [ml/min]	$\sigma_{T_s}$ [°C]	$\sigma_{T_v}$ [°C]
Teplota plotny 100 °C					
53,1	31,6	13,27	5,8	0,8	0,06
163,6	23,6	13,6	2,6	0,5	0,1
264,5	22,3	13,93	3,6	0,4	0,07
375,3	21,8	13,91	2,8	0,4	0,09
483,2	21,6	13,87	2,5	0,3	0,02
Teplota plotny 200 °C					
53,8	51,6	13,774	5,9	1,0	0,009
162,8	34,3	13,85	2,7	0,7	0,07
262,9	31,2	14,6	3,7	0,7	0,2
376,2	30,0	15,1	2,9	0,6	0,09
482,2	30,0	15,4	2,6	0,5	0,1
Teplota plotny 300 °C					
54,8	77,6	15,63	5,8	2,8	0,02
162,3	47,1	15,68	2,7	1,4	0,05
267,7	41,3	16,9	3,8	1,2	0,2
379,1	38,7	17,3	3,0	1,1	0,1
482,8	39,6	18,0	2,5	1,0	0,2

Tab. C: Měření č. 3

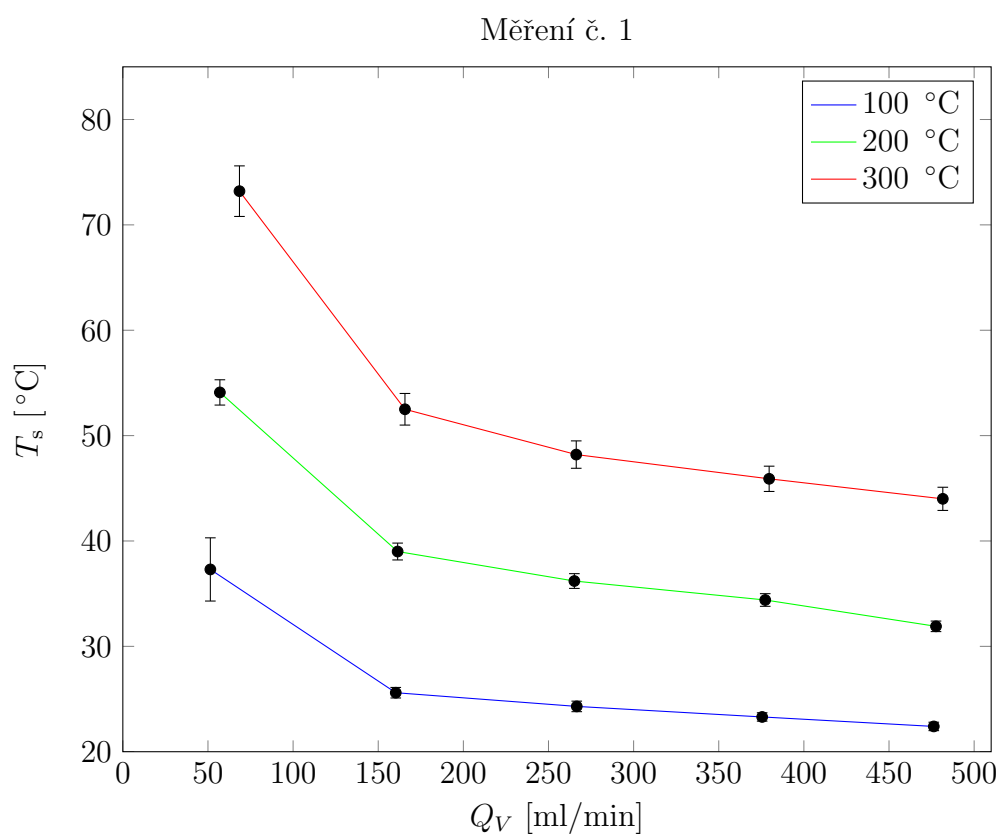
$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]	$T_v$ [°C]	$\sigma_{Q_V}$ [ml/min]	$\sigma_{T_s}$ [°C]	$\sigma_{T_v}$ [°C]
Teplota plotny 100 °C					
55,4	36,9	23,06	5,8	0,6	0,03
164,5	31,8	22,96	2,4	0,4	0,01
270,8	30,8	22,88	3,6	0,4	0,02
389,9	30,2	22,85	3,0	0,4	0,03
487,7	29,6	22,76	2,7	0,3	0,04
Teplota plotny 200 °C					
53,1	56,5	22,30	5,8	1,1	0,04
162,7	41,0	22,6	2,4	0,7	0,1
258,9	37,9	22,95	3,8	0,6	0,09
386,4	36,2	23,00	3,1	0,5	0,03
484,9	35,9	23,21	2,7	0,5	0,06
Teplota plotny 300 °C					
77,6	66,7	18,7	8,1	1,9	0,1
167,5	49,0	19,5	7,6	1,5	0,3
270,5	44,4	20,3	3,8	1,2	0,1
387,0	42,7	21,4	2,9	1,0	0,1
486,2	41,6	22,1	2,7	1,0	0,1

Tab. D: Měření č. 4

$Q_V$ [ml/min]	$T_s$ [°C]	$T_v$ [°C]	$\sigma_{Q_V}$ [ml/min]	$\sigma_{T_s}$ [°C]	$\sigma_{T_v}$ [°C]
Teplota plotny 100 °C					
59,7	35,9	22,7	6,2	0,7	0,1
164,6	31,2	23,05	2,3	0,5	0,05
275,5	30,1	23,11	3,4	0,4	0,04
391,4	29,6	22,97	3,0	0,4	0,05
486,1	29,2	22,84	2,8	0,4	0,04
Teplota plotny 200 °C					
62,8	55,0	22,54	6,3	2,3	0,03
172,5	40,9	22,6	2,3	0,7	0,1
273,2	38,0	22,83	3,7	0,6	0,06
389,2	36,4	22,96	3,0	0,6	0,06
485,6	35,9	23,17	2,8	0,5	0,07
Teplota plotny 300 °C					
55,1	81,1	23,47	5,6	2,4	0,05
163,6	53,3	23,9	2,3	1,5	0,2
271,5	48,0	24,6	3,7	1,2	0,1
391,2	45,5	24,9	2,9	1,0	0,1
489,5	44,3	25,3	4,5	1,0	0,1

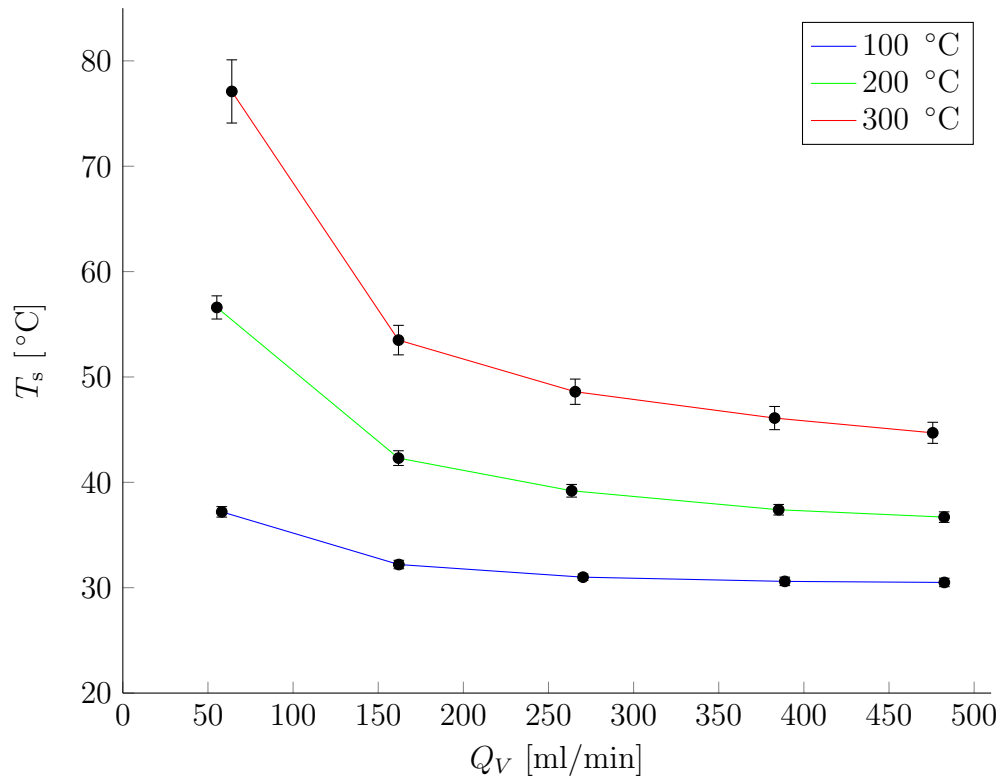
Tab. E: Měření č. 5

## Příloha 2: Grafy jednotlivých měření



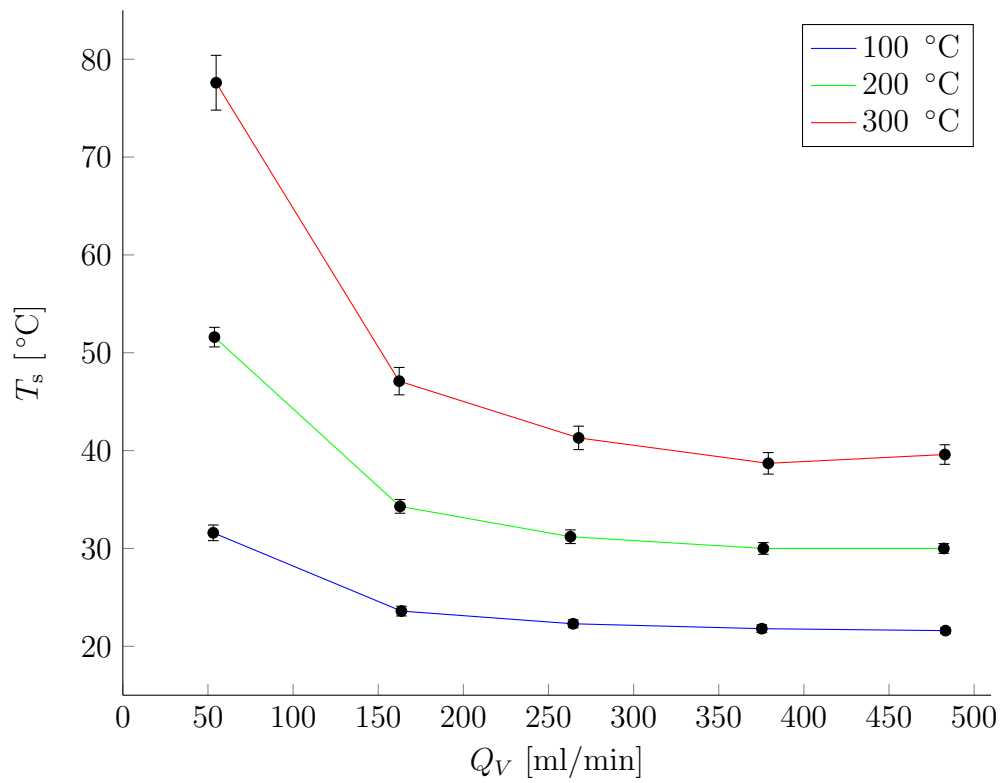
Obr. A: Graf měření č. 1

Měření č. 2



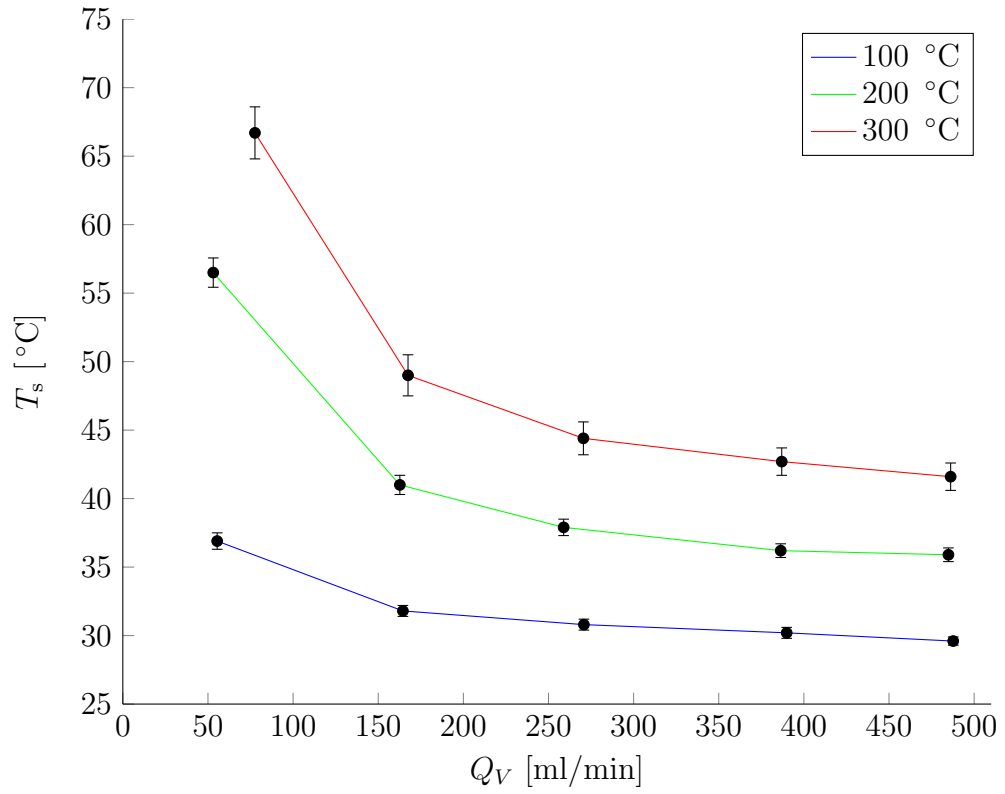
Obr. B: Graf měření č. 2

Měření č. 3



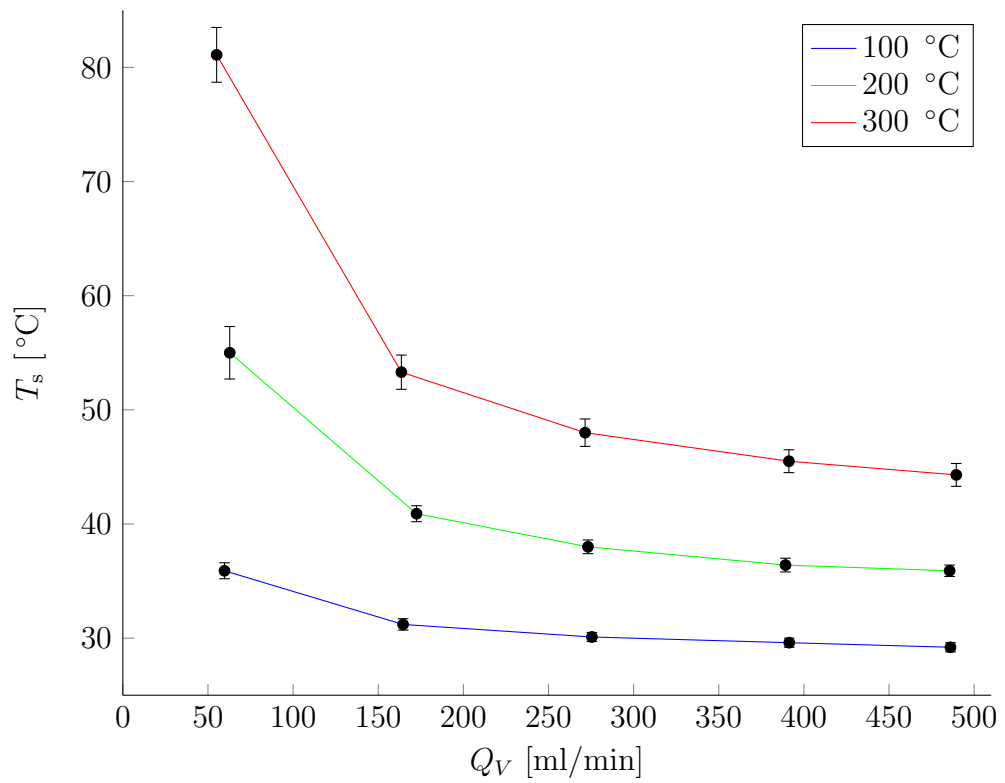
Obr. C: Graf měření č. 3

Měření č. 4



Obr. D: Graf měření č. 4

Měření č. 5



Obr. E: Graf měření č. 5

### Příloha 3: Obsah přiloženého CD

Na přiloženém CD je k dispozici:

- soubor `BP_Lukas_Dokoupil.pdf` - elektronická verze bakalářské práce;
- adresář `BP` obsahující zdrojový kód bakalářské práce pro LaTeX a podadresář `ilustrace` se všemi ilustracemi použitými v bakalářské práci;
- adresář `vysledky` obsahuje tabulky s již zpracovanými výsledky měření ve formátu CSV (hodnot oddělených čárkou) pro snadnou tvorbu grafů pomocí MATLAB skriptů a také časové průběhy měřených veličin vygenerované použitou LabVIEW aplikací;
- adresář `LabVIEW`, ve kterém se nachází zdrojový kód projektu `DAQ_chladici_okruh` použitého ke sběru a ukládání naměřených dat;
- adresář `MATLAB` se skripty použitými k vygenerování grafů z CSV tabulek.