



**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**F3**

**Fakulta elektrotechnická  
Katedra řídicí techniky**

**Bakalářská práce**

# **Měřič průtoku plynu**

**Filip Korf**

**Květen 2022**

**Vedoucí práce: Ing. Jan Novák, Ph.D.**



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Korf** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **491845**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Měřič průtoku plynu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Gas flow meter**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s metodami měření průtoku plynu.
- 2) Prostudujte možnost měření průtoku oxidu uhličitého kalorimetrickou metodou.
- 3) Zvolte vhodnou konfiguraci měřicího systému obsahující vyhřívací tělísko a teplotní senzory.
- 4) Navrhněte zapojení měřicího systému s možností zobrazení a archivace dat.
- 5) Zapojení realizujte ve formě funkčního vzorku.
- 6) Proveďte ověřovací měření.
- 7) Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhněte případná rozšíření.

Seznam doporučené literatury:

- [1] L. Bejček, S. Ďaďo, A. Platil: Měření průtoku a výšky hladiny, BEN 2005, ISBN 80-7300-156-X.
- [2] K. Kadlec: Snímače průtoku - princip, vlastnosti a použití (část 1-3). Automa: časopis pro automatizační techniku, č. 10-12/2006, ISSN 1210-9592.
- [3] M. Husák: Mikrosenzory a mikroaktuátory. Vyd. 1. Praha: Academia, 2008, ISBN 978-80-200-1478-8.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Jan Novák, Ph.D., katedra mikroelektroniky FEL**

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **28.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

Platnost zadání bakalářské práce:

**do konce letního semestru 2022/2023**

Ing. Jan Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování / Prohlášení

Děkuji Ing. Janu Novákovi, Ph.D. za konzultace a vedení mé závěrečné práce. Dále děkuji doc. Ing. Janu Fischerovi, CSc. a Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. z katedry měření za darování procesorů pro tuto práci v současné křemíkové nouzi. Za ochotné poskytnutí 3D tisku patří poděkování Ing. Jiřímu Zemánkovi, Ph.D. a Ing. Křištofu Pučejdlovi z katedry řídicí techniky a paní Petře Martinové z Městské knihovny v Praze. Děkuji také RNDr. Petru Olšákovi z katedry matematiky za rady k šabloně **CTUstyle3**, ve které je tato práce napsaná. Konečně za asistenci při nafukování balónků oxidem uhličitým děkuji milé Jance.

Děkuji všem blízkým, kteří mě v tom co dělám podporují.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 20. května 2022

.....

## Abstrakt / Abstract

Tato práce se zabývá problematikou měření průtoku plynu. Ze známých metod měření průtoku je jich vybráno několik, které jsou použitelné pro plynné médium, jejich principy pak práce popisuje. Detailněji se autor věnuje kalorimetrické metodě, u které se pokouší objasnit rozpor který panuje v literatuře ohledně závislosti hmotnostního průtoku na rozdílu měřených teplot.

Ve druhé části pak práce dokumentuje stavbu měřicího systému určeného k měření malých průtoků oxidu uhličitého právě kalorimetrickou metodou. Měřicí systém se sestává ze samostatné měřicí a vyhodnocovací jednotky a z kalibračního zařízení, tzv. motorizované stříkačky. Na závěr je popsána kalibrace zhotoveného zařízení a jsou prezentovány výsledky testovacích měření.

**Klíčová slova:** měření průtoku, průtok plynu, oxid uhličitý, kalorimetrická metoda, Thomasův princip, vyhřívací tělísko, motorizovaná stříkačka

This thesis deals with the problematics of the gas flow measurement. It describes the basic principle of a few flow measurement methods suitable for gaseous media. Author is concentrating on the calorimetric method, where he tries to explain an existing conflict found in literature related to the dependency of mass flow on the difference of measured temperatures.

The second part of the thesis documents the building process of the measuring system, designed to measure low flow rates of carbon dioxide using the calorimetric method. The measuring system consists of a measuring unit, an evaluation unit and a calibration device, so-called motorized syringe. In the end, the calibration of the built device is described and the test results are presented.

**Keywords:** flow measurement, gas flow, carbon dioxide, calorimetric method, Thomas principle, heating element, motorized syringe

**Title translation:** Gas flow meter

## / Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2 Metody měření průtoku plynu</b>	<b>2</b>
2.1 Teoretické minimum . . . . .	2
2.1.1 Průtok . . . . .	2
2.1.2 Proudění . . . . .	3
2.1.3 Bernoulliho rovnice . . . . .	4
2.2 Rozdělení metod . . . . .	5
2.3 Metody přímé . . . . .	6
2.4 Metody nepřímé měřicí . . . . .	7
2.4.1 Tlak . . . . .	7
2.4.2 Rychlost . . . . .	8
2.4.3 Průřez potrubí . . . . .	9
2.4.4 Kinetickou energii . . . . .	10
2.4.5 Teplotu . . . . .	10
<b>3 Rozbor problému</b>	<b>14</b>
3.1 Možnost použití kalorimetrické metody pro malé průtoky CO <sub>2</sub> . . . . .	14
3.2 Návrh měřicího zařízení . . . . .	15
3.2.1 Měřicí jednotka . . . . .	16
3.2.2 Vyhodnocovací jednotka . . . . .	17
<b>4 Stavba měřicího systému</b>	<b>20</b>
4.1 Měřicí jednotka . . . . .	20
4.2 Vyhodnocovací jednotka . . . . .	22
4.2.1 Hardware . . . . .	22
4.2.2 Software . . . . .	23
4.3 Kalibrační zařízení – motorizovaná stříkačka . . . . .	25
<b>5 Provedená měření</b>	<b>28</b>
5.1 Prvotní testování . . . . .	28
5.2 Kalibrace na vzduch – hledání závislosti $Q_V(\Delta T)$ . . . . .	30
5.3 Kalibrace na CO <sub>2</sub> . . . . .	32
5.4 Ověřovací měření s CO <sub>2</sub> . . . . .	34
5.5 Diskuze výsledků . . . . .	36
<b>6 Závěr</b>	<b>37</b>
<b>Literatura</b>	<b>38</b>
<b>A Celkové schéma měřicího zařízení</b>	<b>41</b>
<b>B Celkové schéma motorizované stříkačky</b>	<b>42</b>
<b>C Elektronické přílohy</b>	<b>43</b>

## Tabulky / Obrázky

<b>3.1</b>	Porovnání vzduchu a CO <sub>2</sub> .....	14
<b>3.2</b>	Použití měřičů průtoku plynu .	15
<b>4.1</b>	Steinhart-Hartovy koeficienty užitých termistorů.....	24
<b>5.1</b>	Naměřené hodnoty při kalibraci se vzduchem .....	30
<b>5.2</b>	Naměřené hodnoty při kalibraci s CO <sub>2</sub> .....	32
<b>5.3</b>	Hodnoty z ověřovacího měření s CO <sub>2</sub> .....	34
<b>2.1</b>	Kvadratický rychlostní profil ....	3
<b>2.2</b>	Primární rozdělení metod měření .....	5
<b>2.3</b>	Bubnový plynoměr .....	6
<b>2.4</b>	Membránový plynoměr .....	6
<b>2.5</b>	Škrťací orgány v potrubí .....	7
<b>2.6</b>	Pitotova trubice .....	7
<b>2.7</b>	Turbínkový a lopatkový průtokoměr .....	8
<b>2.8</b>	Ultrazvukový průtokoměr.....	8
<b>2.9</b>	Ultrazvukový průtokoměr s opakovaným odrazem .....	9
<b>2.10</b>	Ultrazvukový průtokoměr pro malé průtoky.....	9
<b>2.11</b>	Plováčkový průtokoměr .....	10
<b>2.12</b>	Terčíkový průtokoměr.....	10
<b>2.13</b>	Kalorimetrický průtokoměr ....	11
<b>2.14</b>	Teplotní profily v kalorimetrickém průtokoměru.....	12
<b>2.15</b>	Šíření tepla v kalorimetrickém průtokoměru .....	12
<b>3.1</b>	Blokové schéma měřicího systému .....	15
<b>3.2</b>	Blokové schéma měřicí jednotky .....	16
<b>3.3</b>	Výkres navrženého vyhřívacího tělíska .....	17
<b>3.4</b>	Schéma cího obvodu .....	18
<b>3.5</b>	Schéma spínání vytápění .....	19
<b>3.6</b>	Blokové schéma vyhodnocovací jednotky .....	19
<b>4.1</b>	Zhotovené vyhřívací tělísko ....	20
<b>4.2</b>	Trubička osazená termistorem .	21
<b>4.3</b>	Měřicí jednotka usazená v krabici.....	21
<b>4.4</b>	Vyhodnocovací jednotka .....	22
<b>4.5</b>	Uživatelské rozhraní měřicího zařízení.....	23
<b>4.6</b>	Blokové schéma motorizované stříkačky .....	25
<b>4.7</b>	Motorizovaná stříkačka .....	25
<b>4.8</b>	Ovládací panel motorizované stříkačky .....	26
<b>4.9</b>	Uživatelské rozhraní motorizované stříkačky .....	26



<b>4.10</b>	Zadní část motorizované stříkačky .....	27
<b>4.11</b>	DPS pro elektroniku motorizované stříkačky .....	27
<b>4.12</b>	Celý měřicí systém .....	27
<b>5.1</b>	Časové průběhy prvotního testování .....	29
<b>5.2</b>	Ofukování trubičky v měřicí jednotce ventilátorem .....	30
<b>5.3</b>	Časové průběhy prvotního testování s ventilátorem.....	31
<b>5.4</b>	Závislost $Q_V(\Delta T)$ pro vzduch .	32
<b>5.5</b>	Porovnání závislostí $Q_V(\Delta T)$ pro vzduch a oxid uhličitý .....	33
<b>5.6</b>	Měřicí charakteristika zhotoveného zařízení .....	34
<b>5.7</b>	Časové průběhy vybraných ověřovacích měření .....	35

## Symbols / Zkratky

$a, b$	parametry modelů $Q_V(\Delta T)$	AČ	analogově-číslicový převod
$A$	konstanta závislosti hmotnostního průtoku na rozdílu teplot	DIN	standardizovaný typ konektoru
$A, B, C$	Steinhart-Hartovy koeficienty (teplota <sup>-1</sup> )	DPS	deska plošných spojů
CO <sub>2</sub>	oxid uhličitý	N/A	Not Available – hodnota není dostupná
$c_p$	měrná tepelná kapacita média (délka <sup>2</sup> · čas <sup>-2</sup> · teplota <sup>-1</sup> )	NTC	Negative Temperature Coefficient – má-li termistor záporný teplotní koeficient, jeho odpor při zvětšení teploty klesá
$d$	průměr potrubí	OLED	technologie svítících diod
$d_0, m_0$	parametry infinitezimálně nízkých válečků	SD	Secure Digital – typ paměťové karty
$g$	tíhové zrychlení	SMD	Surface Mount Device – součástka k pájení na povrch
$[j]$	= [ml] · [min] <sup>-1</sup> · [°C] <sup>-½</sup>	SPI	Serial Peripheral Interface – jednoduchá sériová sběrnice
$m$	hmotnost protečeného média	USB	Universal Serial Bus – hojně využívaná univerzální sběrnice
M3	metrický závit průměru 3 mm		
N <sub>2</sub>	dušík		
O <sub>2</sub>	kyslík		
$p$	statický tlak		
$p^*$	celkový tlak		
$P$	topný výkon		
$Q$	tepelná energie		
$Q_m$	hmotnostní průtok (hmotnost · čas <sup>-1</sup> )		
$Q_V$	objemový průtok (délka <sup>3</sup> · čas <sup>-1</sup> )		
$Q_{V,apl}$	aplikovaný objemový průtok		
$Q_{V,linT}$	lineární trend objemového průtoku		
$r$	nějaký poloměr v potrubí		
$R$	poloměr potrubí, příp. odpor termistoru		
$R_{DS(ON)}$	odpor mezi vývody Drain a Source sepnutého tranzistoru		
$R^2$	= $\frac{\text{variance modelu}}{\text{celková variance}}$ [10]		
Re	Reynoldsovo číslo (bezrozměrné)		
Re <sub>K</sub>	kritická hodnota Reynoldsova čísla		
$S$	obsah plochy průřezu potrubí		
$t$	čas		
T	snímač teploty		
$T, T_1, T_2$	teploty		
$U_{max}$	maximální napájecí napětí		
$v$	rychlost proudění		
$\bar{v}$	střední rychlost proudění		
$v_{max}$	maximální rychlost proudění		

$V$	objem protečeného média
$z$	výška
$\Delta T$	rozdíl teplot
$\nu$	kinematická viskozita média (délka <sup>2</sup> · čas <sup>-1</sup> )
$\pi$	Ludolfovo číslo
$\rho$	hustota média



# Kapitola 1

## Úvod

Práce se bude věnovat měření průtoku plynu. Cílem teoretické části je popsat základní principy několika metod měření průtoku, které jsou principiálně použitelné pro médium v plynném skupenství. Dále detailněji rozebrat fungování kalorimetrické metody a posoudit možnost jejího využití pro měření malého průtoku oxidu uhličitého.

Tvůrčí část si pak klade za cíl navrhnout měřicí zařízení, vyrobit jej, zdokumentovat výrobu a implementaci softwaru a popsat problémy s tím spojené. V rámci této části bude samozřejmě provedeno i kalibrační a testovací měření, které bude ověřovat dosaženou úroveň funkčnosti.

K výběru tohoto tématu práce mě vedla hlavně motivace v závěru poměrně teoretického studia vyrobit něco hmatatelného, a to od začátku do konce skládáním z elementárních součástí s minimálním využitím hotových celků.

# Kapitola 2

## Metody měření průtoku plynu

### 2.1 Teoretické minimum

Než se pustím do popisu jednotlivých typů průtokoměrů, které prakticky využívají fyzikální teorii, bude vhodné nejdůležitější z této teorie ve stručnosti připomenout. Zároveň bude v této sekci zavedeno značení některých veličin dále použité v celé práci.

#### 2.1.1 Průtok

V první řadě je potřeba připomenout, jak průtok definujeme jako fyzikální veličinu. Rozlišujeme mezi průtokem objemovým a hmotnostním. V prvním případě se jedná o derivaci objemu podle času, ve druhém případě se podle času derivuje hmotnost. Tedy

$$Q_V = \frac{dV}{dt}, \quad Q_m = \frac{dm}{dt}, \quad [\text{např. 15}]$$

kde:

- $Q_V$  je objemový průtok,
- $Q_m$  je hmotnostní průtok,
- $V$  je objem,
- $m$  je hmotnost,
- $t$  je čas.

Průtok se vždy vztahuje ke konkrétnímu průřezu potrubím a množstevní veličiny  $V$  a  $m$  v tomto případě popisují množství látky, které již tímto průřezem protéklo.

Rozměr průtoku je samozřejmě délka<sup>3</sup> · čas<sup>-1</sup> respektive hmotnost · čas<sup>-1</sup>. Jednotkou tedy může být například kg/s či kg/hod. respektive m<sup>3</sup>/s, m<sup>3</sup>/hod., l/s nebo v tvůrčí části této práce používaný ml/min.

Vztah mezi objemovým a hmotnostním průtokem je pak dán stejně jako vztah mezi objemem a hmotností, to jest hustotou  $\rho$ :

$$Q_m = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho \cdot V)}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot Q_V.$$

Podle definičních vztahů pak lze psát ještě

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q_V dt, \quad m = \int_{t_1}^{t_2} Q_m dt. \quad [\text{např. 15}]$$

Z těchto rovnic plyne, že vybavíme-li měřič průtoku časovačem a numerickým integrátorem, může pak sloužit i jako měřič objemu či hmotnosti [15, 22]. Na rozdíl od obvyklých přístrojů pro měření těchto veličin (např. odměrný válec či váha) však průtokoměr v jejich roli nebude vyžadovat, aby se látka během měření shromáždila na jednom místě.

Poslední myšlenkou této podsekcce je jak vypočítat průtok ze znalosti rychlosti proudění  $v$ . Pro zatím předpokládám, že je tato rychlost všude v potrubí stejná. Jak již bylo zmíněno, průtok se vždy vztahuje k nějakému průřezu potrubím a v tomto případě je intuitivní, že se stačí podívat na obsah plochy  $S$  tohoto průřezu, rychlostí proudění jej vynásobit a výsledkem je objemový průtok:

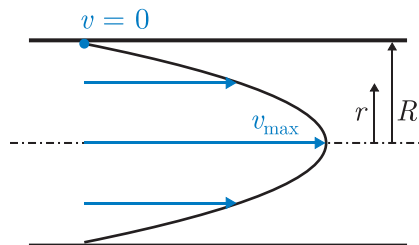
$$v \cdot S = Q_V.$$

Dalším předpokladem tohoto výpočtu je, že potrubí je látkou zcela zaplněné. Jelikož se však tato práce zaměřuje na měření průtoku plynu, u kterého se s žádnými otevřenými kanály či koryty nesetkáváme, tento předpoklad považuji v celé práci automaticky za splněný.

Vrátím se ještě k prvnímu předpokladu, a to že rychlost proudění je ve všech částech potrubí stejná. Svět bohužel není tak ideální, aby se tímto způsobem běžně látky chovali. Tím se dostávám k další podsekcce, nejprve však ještě zmíním, že uvedený vztah bude platit i bez splnění prvního předpokladu, pokud rychlost  $v$  nahradíme střední rychlostí proudění  $\bar{v}$  [6, 15].

### ■ 2.1.2 Proudění

V mechanice tekutin rozlišujeme mezi laminárním prouděním a prouděním turbulentním. V případě laminárního proudění *se částice tekutiny pohybují po drahách, které se navzájem nekříží* [6, s. 28]. Největší vliv na chování tekutiny má tření [6]. Podle [11] odpovídá rychlostní profil v potrubí s kruhovým průřezem rotačnímu paraboloidu (v řezu na obr. 2.1). To znamená, že největší rychlost proudění je v ose potrubí. Směrem ke stěnám potrubí se rychlost zmenšuje až na nulu, přičemž rozdíl rychlosti na daném poloměru a rychlosti maximální roste s poloměrem kvadraticky.



**Obrázek 2.1.** Kvadratický rychlostní profil laminárního proudění

V [11] je s využitím integrace přes plochu průřezu dále odvozeno, že

$$\bar{v} = \frac{1}{2}v_{\max}.$$

U turbulentního proudění je situace složitější a v této práci asi nemá smysl podrobně se mu po teoretické stránce věnovat. Uvádím tedy jen několik základních faktů:

- dochází zde ke křížení drah částic, [6]
- vznikají zde víry a částice se pohybují i protisměru proudění, [6, 18]
- mechaniku výrazně ovlivňuje setrvačnost částic, [6]
- stejně jako u laminárního proudění má rychlostní profil maximum v ose potrubí, ale celkově je plošší. [6, 11]

Co se týče rozlišení mezi laminárním a turbulentním prouděním – nejedná se o dvě ostře vymezené skupiny, naopak je mezi nimi spojitý přechod. Podobnost laminárnímu či turbulentnímu proudění se pak stanovuje na základě Reynoldsova čísla, jednoho z podobnostních čísel, pro kruhový průřez potrubí definovaného jako:

$$\text{Re} = \frac{\bar{v} d}{\nu},$$

příčemž:

- Re je Reynoldsovo číslo (bezrozměrné),
- $\bar{v}$  je střední rychlost proudění,
- $d$  je průměr potrubí,
- $\nu$  je kinematická viskozita proudící látky ( $\text{délka}^2 \cdot \text{čas}^{-1}$ ). [6, 11, 18]

Jako  $\text{Re}_K$  se pak označuje kritická hodnota. Proudění se podobá laminárnímu je-li vypočtená hodnota menší než  $\text{Re}_K$  a turbulentnímu v případě opaku. Na konkrétní kritické hodnotě se literatura přesně neshodne. Kniha [11] uvádí kritickou hodnotu laminárního proudění 2 320 a 10 000 pro proudění turbulentní (v intervalu mezi těmito hodnotami je proudění přechodné). Novější publikace [22] udává hodnoty 2 000 a 4 000. Webová stránka [18] píše obecně že  $\text{Re}_K$  bývá udávána v intervalu 1000–20 000.

### ■ 2.1.3 Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnici je potřeba připomenout pro pochopení principu průtokoměru u nichž je průtok stanovován na základě měřených tlaků. Nejprve tedy samotné znění:

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = \text{konst.},$$

kde:

- $\rho$  je hustota proudící látky,
- $v$  je rychlost proudění,
- člen  $1/2 \rho v^2$  je dynamický tlak,
- $g$  je tíhové zrychlení,
- $z$  je výška,
- $p$  je statický tlak. [2]

V první řadě je potřeba říct o jakou rychlost proudění se v tomto případě jedná. Obecně řečeno se jedná o rychlost proudění na dané proudnici. Tedy ve tvaru rovnice

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g z_1 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g z_2 + p_2$$

musí být  $v_1$  a  $v_2$  rychlosti částic na stejné proudnici. [2] Jelikož však tato práce termín proudnice nevysvětluje, lze s újmou na obecnosti za  $v$  dosadit například  $v_{\max}$ .

Při praktickém využití Bernoulliho rovnice v průtokoměrech se její prostřední člen na levé straně, odpovídající aerostatickému tlaku, zanedbává a lze pak psát pouze

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{konst.} = p^*,$$

tedy že součet tlaku dynamického a statického je roven tlaku celkovému, označenému  $p^*$ , který je konstantní. [2, 6, 12]

Nelze opomenout specifikovat za jakých předpokladů rovnice platí:

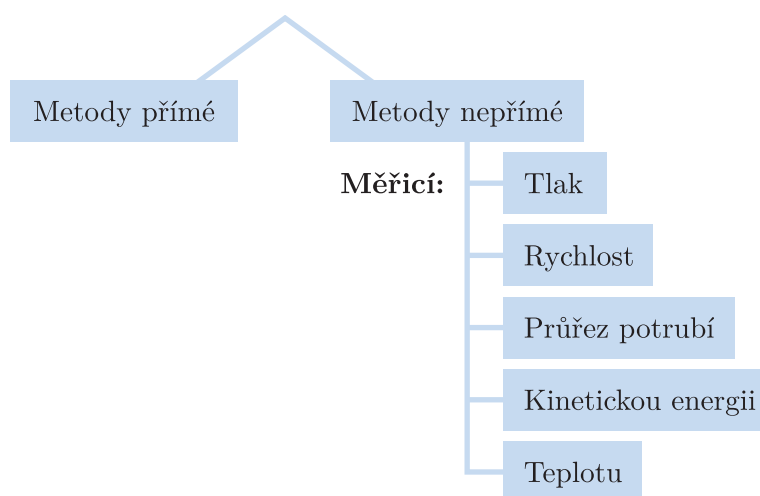
- tekutina musí být nestlačitelná (vzduch lze při nízkých rychlostech za nestlačitelný považovat),
- tekutina musí být nevazká (není uvažováno její vnitřní tření),
- musí se jednat o stacionární proudění. [2, 12]



Existují i obecnější verze rovnice, které pokryjí případy s nesplněným prvním nebo druhým předpokladem [2], ty jsou ovšem mimo rozsah této práce.

## 2.2 Rozdělení metod

Jak už to obvykle bývá, když se něco rozděluje do kategorií, autoři se na jednotném rozdělení neshodnou. Pro tuto práci jsem převzal myšlenku na rozdělení z [sek. 3.0 a 3.1, 6], ale jelikož se jej tato kniha v dalších kapitolách striktně nadržuje, některé metody a kategorie jsem dorozdělal v souladu s touto myšlenkou sám. Primární dělení metod (podle způsobu měření) použité v této práci jsem znázornil do diagramu na obrázku 2.2.



**Obrázek 2.2.** Primární rozdělení metod měření

Nejprve průtokoměry rozdělíme podle toho, zda se v jejich případě jedná o měření přímé, tedy zda je měřenou veličinou skutečně přímo hmotnostní či objemový průtok, nebo zda měří nepřímě, tedy jinou veličinu a samotný průtok se následně dopočítává z dodatečně znalosti dalších parametrů. Touto veličinou může být tlak, rychlost, průřez potrubí, kinetická energie, nebo teplota – podle toho jsem nepřímé metody rozdělil do dalších pěti podkategorií.

Sekundárně pak můžeme metody dělit z energetického hlediska, a to na metody které protékajícímu plynu energii ubírají a na ty které ji naopak přidávají. Do prvního jmenovaného druhu patří například průtokoměry s clonou měřící tlakový rozdíl. Úbytek energie se pak projeví jako trvalá tlaková ztráta. Do druhého jmenovaného druhu pak patří například průtokoměr kalorimetrický, kterému se práce dále věnuje. [6]

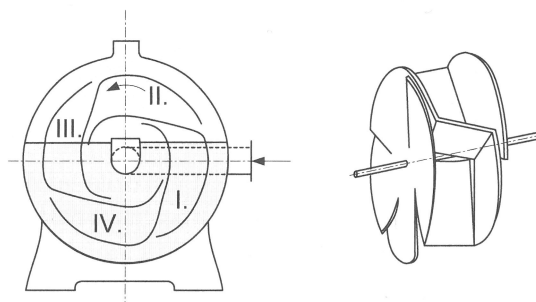
Literatura typicky nerozlišuje mezi průtokoměry plynu a kapalin, místo toho je protékající médium souhrnně označováno jako tekutina. Do zvláštní kategorie jsou vyčleněny pouze průtokoměry na sytké pevné látky. U těchto průtokoměrů může být médiem například písek nebo zrní. Zařazení plynů a kapalin do stejné kategorie však samozřejmě v žádném případě neimplikuje to, že by každá metoda z této kategorie byla vhodná pro každou aplikaci. Tomuto tématu se bude v kontextu konkrétní úlohy této práce v krátkosti věnovat následující kapitola. V následujících sekcích popíšu fungování základních metod, se kterými jsem se seznámil a které jsou principiálně použitelné při měření průtoku plynu. Určitě se však v tomto případě nejedná o jejich vyčerpávající výčet.

## 2.3 Metody přímé

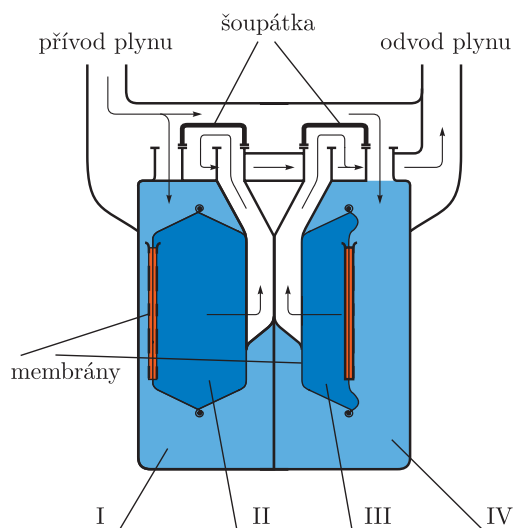
V případě plynu přicházejí v této kategorii v úvahu pouze metody přímo měřící průtok objemový. Zvážit plyn totiž není jednoduché, natož ještě plyn který se pohybuje potrubím. Ovšem i z mnoha různých konstrukcí objemových průtokoměrů je jich pouze menšina vhodná k měření průtoku plynu.

Uvedu dva zástupce. Základní princip je u všech objemových průtokoměrů stejný, mechanismus průtokoměru dělí plyn do malých komor o známém objemu, které se cyklicky plní a vyprazdňují. Rychlost s jakou se tento cyklus opakuje je pak přímo úměrná objemovému průtoku. [1, 6, 15]

Prvním zástupcem je plynoměr bubnový nakreslený na obrázku 2.3. Komory jsou tvořeny čtyřmi částmi bubínku, každá má svojí vstupní a výstupní šterbinu. Důležitou roli hraje kapalina, která vyplňuje více než polovinu těla plynoměru, ve kterém je bubínek usazen. Přívod plynu je skrz osu bubínku. Odtud se začíná plynem plnit komora, jejíž vstupní šterbina je aktuálně nad přívodem (na obr. je to komora I). Plnění komory plynem způsobí vypouštění kapaliny a otáčení bubínku proti směru hodinových ručiček. Kapalina se současně skrz vstupní šterbiny napouští do komor (na obr. II a III), což zase vede k vypuštění plynu a jeho odchod potrubím shora. [6, 15]



**Obrázek 2.3.** Bubnový plynoměr a detail bubínku (převzato z [6], upraveno)



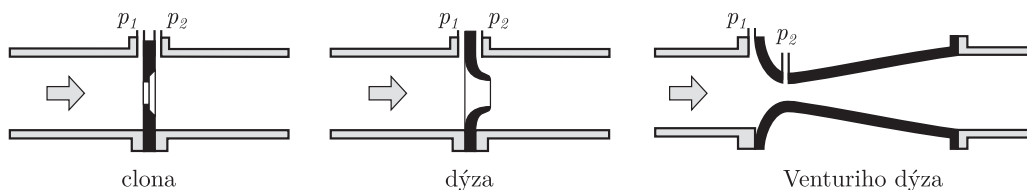
**Obrázek 2.4.** Membránový plynoměr (převzato z [15], upraveno)

Jako druhého zástupce uvádím plynoměr membránový. Taktéž je tvořen čtyřmi komorami, jejichž objem je však proměnný. V první fázi se z přívodu plynu naplní komory na obrázku 2.4 číslované I a IV. Jejich naplnění zatlačí membrány směrem do středu přístroje a vypustí tak komory II a III. Membrány jsou připevněné k mechanismu (na obrázku není nakreslen) který kromě toho že slouží jako výstup senzoru také posune dvě šoupátka. V další fázi se pak plynem opětovně plní komory II a III, vypouštějí se komory I a IV a membrány společně se šoupátky se zase vrací do původní polohy. [1, 15]

## 2.4 Metody nepřímé měřící

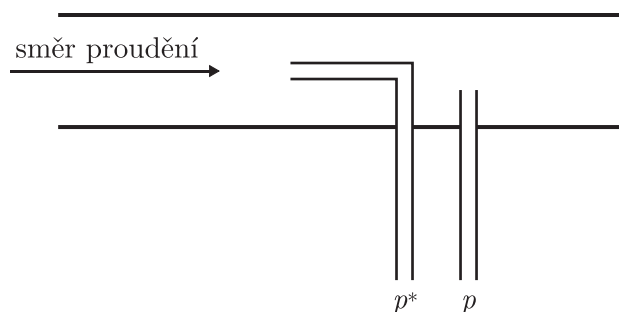
### 2.4.1 Tlak

Tento typ měřičů využívá toho, že rychlost proudění se dá vypočítat ze znalosti dynamického tlaku. První možností jak zjistit dynamický tlak je umístit do potrubí překážku (tzv. škrťací orgán) a měřit rozdíl statických tlaků před a za překážkou. Škrťacích orgánů existuje celá řada, několik z nich je ukázáno na obrázku 2.5. [6]



**Obrázek 2.5.** Škrťací orgány v potrubí (převzato z [15], upraveno)

Druhou možností je využití zjednodušeného tvaru Bernoulliho rovnice uvedeného v podsece 2.1.3 – tedy odečtení změřeného statického tlaku od změřeného celkového tlaku. Této možnosti využívá známá Pitotova trubice (na obrázku 2.6) a také její modifikace – Prandtlova trubice. [1]



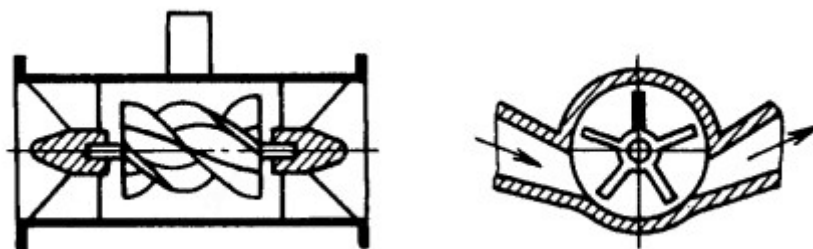
**Obrázek 2.6.** Odběr tlaků v pitotově trubici

Celkový tlak se v Pitotově trubici odebírá proti směru proudění, statický tlak pak buď ve směru proudění, případně kolmo na něj. [6]

### 2.4.2 Rychlost

Seznámil jsem se třemi základními metodami, které řadím do této skupiny. První z nich jsou průtokoměry turbínkové. Jejich princip je poměrně jasný – proudící plyn roztáčí turbínku, vrtulku či lopatky, jejichž úhlová rychlost je přímo úměrná rychlosti proudění a tedy objemovému průtoku. [5] Na obrázku 2.7 jsou ukázány dvě z možných konstrukcí.

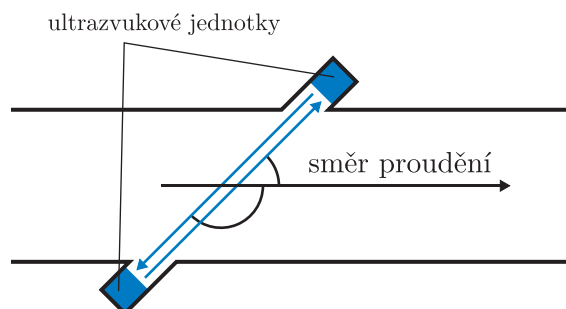
Na první pohled by však nemusel být patrný rozdíl oproti přístrojům měřícím objemový průtok přímo. Zdůrazňuji proto, že turbínky, vrtulky ani lopatky nedělí plyn na malé objemy, které by byly přesně dávkované. V principu tedy vrtulka nemusí zabírat většinu průřezu, postačí reprezentativní měření rychlosti na části průřezu. Část objemu by pak protékla zcela bez kontaktu s ní.



**Obrázek 2.7.** Turbínkový a lopatkový průtokoměr (převzato [25], upraveno)

Druhou možností pro změření rychlosti proudícího plynu je použití dvou ultrazvukových jednotek, které v sobě obsahují jak vysílač, tak i přijímač. Existuje i metoda s jedinou takovou jednotkou, která využívá Dopplerova jevu, ta je však použitelná pouze v nehomogenních médiích obsahujících částice od kterých se může ultrazvuk odrazit. [1] Takovými médii jsou typicky spíše kapaliny než plyny, a proto tuto metodu dále nezmiňuji.

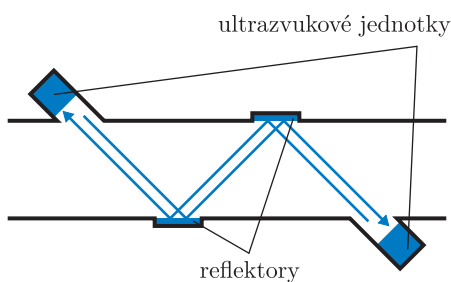
V případě dvou ultrazvukových jednotek je pro fungování nutné, aby byly na potrubí umístěny tak, aby směr vyslaného ultrazvuku z první jednotky do druhé svíral se směrem průtoku ostrý úhel, jak je to naznačeno na obrázku 2.8. Směr ultrazvuku vyslaného z druhé jednotky do první pak bude se směrem proudění samozřejmě svírat úhel doplňkový. Bude-li tento doplňkový úhel tupější a první zmíněný úhel ostřejší, tj. směr se bude blížit směru proudění, bude metoda citlivější.



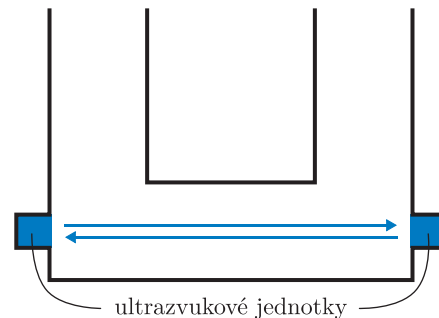
**Obrázek 2.8.** Průtokoměr využívající dvě ultrazvukové jednotky

Rychlost proudění se pak usuzuje z rozdílu časů, za který překoná vzdálenost mezi jednotkami ultrazvukové vlnění ve směru blížícím se směru proudění a to jehož směr se blíží protisměru proudění. S odečtením časů se odečte čas nutný k překonání vzdálenosti v klidovém stavu (médium neproudí) a mezi rozdílem a rychlostí proudění pak již platí přímá úměra. [1]

Pro zvýšení citlivosti se využívají reflektory, které ultrazvuk před dopadem do druhé jednotky odrazí (i vícekrát), čímž se prodlouží vzdálenost mezi jednotkami. [15] Ukázka takové konfigurace je na obrázku 2.9. V případě malých průtoků, u kterých nehraje velkou roli aerodynamika je pak možné volit extrémní konfiguraci z obrázku 2.10, u které je dříve zmiňovaný ostrý úhel nulový a tupý úhel přímý. [4]



**Obrázek 2.9.** Ultrazvukový průtokoměr s opakovaným odrazem



**Obrázek 2.10.** Ultrazvukový průtokoměr pro malé průtoky

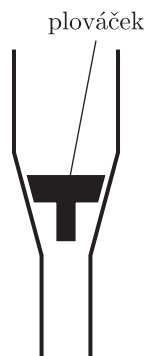
Poslední metodou zařazenou do této kategorie je metoda značkování. Jedná se o velmi specifickou metodu, která do plynu proudícího potrubím přidá značku. Na potrubí je dále detektor, který přítomnost značky zachytí a z času který značka trvalo urazit známou vzdálenost mezi místem, kde byla do potrubí přidána a detektorem, se určí její rychlost, u které se má zato že odpovídá střední rychlosti plynu. [1, 6]

Značkou může být přidaná látka – pro měření průtoku plynů se využívají dobře detekovatelné radioaktivní izotopy kryptonu, argonu či xenonu [1] – případně je možné vytvořit značku tepelnou. V takovém případě se krátce zapne vyhřívací element a časový posun se hledá pomocí maxima korelace výstupních signálů dvou detektorů (teploměrů) umístěných dále ve směru proudu ve známé vzdálenosti. [6]

### ■ 2.4.3 Průřez potrubí

Do této skupiny patří průtokoměry plováčkové. Tento typ průtokoměrů vyžaduje část potrubí ve svislém směru, ve kterém je umístěný plováček. Existuje více konstrukcí, nejtypičtější je směrem nahoru kuželovitě se rozšiřující potrubí tak, jak je nakresleno na obrázku 2.11.

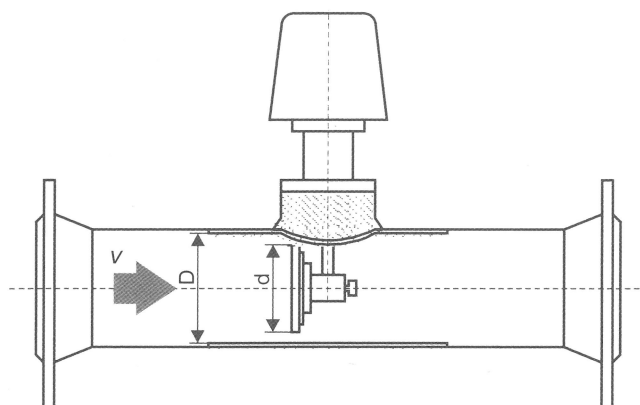
Směrem dolů samozřejmě stahuje plováček tíhová síla, směrem nahoru naopak plováček vynáší protékající plyn, který si tak zvětšuje plochu průřezu potrubí tvaru mezikruží. Podle [6] a [14] je pak objemový průtok závislý pouze na obsahu této plochy. Odečet měřených hodnot probíhá odečtem výšky plováčku, který může být v případě průhledného potrubí vizuální, u potrubí neprůhledného může být použito například magnetického snímání polohy. [14]



**Obrázek 2.11.** Plováчковý průtokoměr

#### ■ 2.4.4 Kinetickou energii

Tato podsekcce krátce pojedná o principu průtokoměrů deformačních. Tyto průtokoměry mají v potrubí umístěnou překážku, do které protékající plyn naráží, působí na ní silou a způsobuje její vychýlení, případně natočení. Opět je více možných konstrukcí, jednou z nich je průtokoměr s terčíkem, v řezu vyobrazený na obr. 2.12. [6]



**Obrázek 2.12.** Terčíkový průtokoměr (převzato z [22])

Průtok se pak v případě těchto přístrojů stanovuje měřením síly vyvolané proudícím médiem [22]. To již probíhá mimo potrubí. K deformaci, podle které tyto přístroje nazýváme, pak dochází u pružiny, která vychýlenou překážku vrací do výchozí polohy [24].

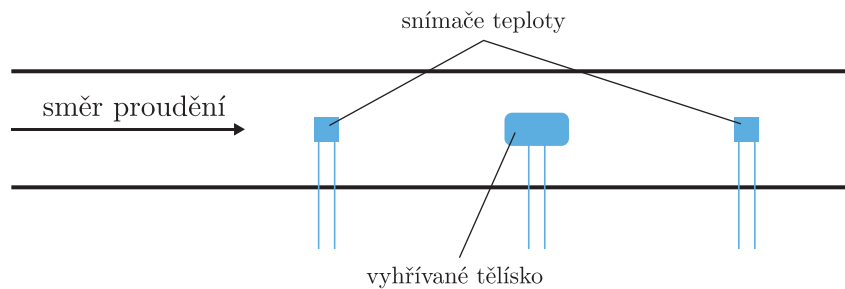
#### ■ 2.4.5 Teplotu

Literatura [1, 6–7, 15] se shoduje, že do této skupiny se řadí dva typy průtokoměrů. Prvním typem jsou hmotnostní termoanemometry, jejichž základem je vyhřívání tělíska (např. drátek) umístěné do potrubí. Protékající médium toto tělísko ochlazuje, přičemž podle míry ochlazení se stanovuje průtok. Druhým typem jsou kalorimetrické hmotnostní průtokoměry, na které je tato podsekcce zaměřena především, protože je na tuto metodu měření průtoku zaměřena i následná tvůrčí část práce.

Již podle názvu je jasné, že v případě kalorimetrických hmotnostních průtokoměrů se jedná o nepřímé měření průtoku hmotnostního. Je tomu tak z principu, protože nositelem tepelné kapacity látky je primárně hmotnost, nikoliv objem. Někteří autoři dokonce uvádí, že hmotnostní průtok je měřen přímo. Z energetického hlediska je tato metoda

jako jedna z mála řazena k metodám, které proudícímu médiu energii dodávají. Tlaková ztráta kterou je médium po průchodu průtokoměrem poznamenané je minimální a energie je naopak dodaná ve formě tepla [1, 6].

Základní konstrukce průtokoměru využívajícího tuto metodu je ukázána na obrázku 2.13. Obdobně jako v případě termoanemometru je hlavní součástí do potrubí umístěné vyhřívací tělísko. Rozdílem metody je, že namísto ochlazení tělíska se měří oteplení média [6–7], k čemuž slouží dva teplotní senzory umístěné symetricky ve stejné vzdálenosti před a za vyhřívacím tělískem. Typicky se používají odporové senzory teploty – termistory či platinové, může však být užito i termočlánků [15].



**Obrázek 2.13.** Základní konstrukce kalorimetrického průtokoměru

Existuje mnoho obměn této základní konstrukce. Kupříkladu vyhřívání a snímání teploty může být situováno vně dobře tepelně vodivého potrubí [6, 13]. Dále pro větší možnosti sledování tepelného profilu mohou být použita dvě vyhřívací tělíska a tři snímače teploty [1]. Často se také touto metodou měří vzorek průtok v obtoku – odděleném rameni potrubí menší světlosti. Pak je ovšem potřeba zajistit, aby byl průtok obtokem přímo úměrný průtoku hlavním ramenem. Za tímto účelem se do potrubí vkládají laminární členy [1, 15] – plošky rovnoběžné s osou potrubí, které se snaží zamezit turbulencím a přimět médium k proudění laminárnímu.

Hmotnostní průtok je tedy závislý na rozdílu teplot na snímačích před a za vyhřívacím elementem. V případě odporových senzorů teploty se pro vyhodnocení typicky užije zapojení do plného Wheatstoneova můstku se zesílením napětí z měřicí diagonály [7]. Jelikož se v závislosti jako parametr objevuje také měrná tepelná kapacita proudící látky, je nutné průtokoměry využívající tuto metodu při změně média překalibrovat [6].

Co se týče konkrétní závislosti, v literatuře existuje velký rozpor. Zatímco [6], [7] a [15] uvádí:

$$Q_m = A \frac{c_p (T_2 - T_1)}{P},$$

kde

- $A$  je konstanta rozměru  $J^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-2}$  (článek [15] uvádí konstantu ve jmenovateli zlomku s reciprokým rozměrem),
- $c_p$  je měrná tepelná kapacita proudící látky,
- $T_2 - T_1$  je rozdíl teplot na snímačích,
- $P$  je topný výkon dodávaný vyhřívacím tělískem,

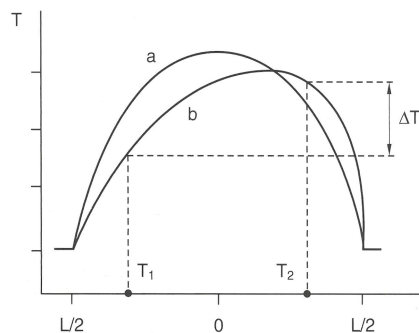
v [1] a v [13] je udávána zcela obrácená závislost:

$$Q_m = \frac{P}{A c_p (T_2 - T_1)} [1], \quad Q_m = \frac{P}{c_p (T_2 - T_1)} [13].$$

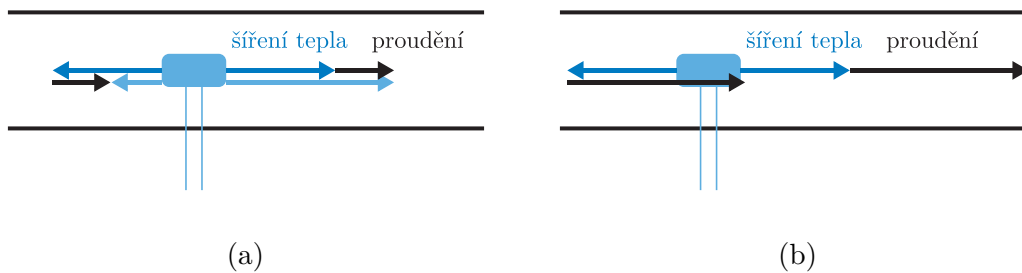
Příčemž i [1] připouští, že v případě nulového průtoku jsou teploty stejné, čemuž uváděná rovnice zcela evidentně odporuje.

Vysvětlení tohoto rozporu jsem nikde nenalezl, a proto se o něj pokusím sám. Domnívám se, že v okolí nuly přibližně platí přímá úměra a při větších průtocích pak začíná přibližně platit úměra nepřímá – znamenalo by to ovšem, že  $Q_m(T_2 - T_1)$  vůbec nebude funkce, protože  $\Delta T(Q_m)$  nebude prostá. Spatřuji zde totiž dva protichůdné principy:

V případě, že je průtok nulový, teplo se z vyhřívacího tělíska šíří na obě strany stejně, vytvoří se osově souměrný teplotní profil A podle obrázku 2.14 a teplota na snímačích bude stejná [1, 6, 23]. Začne-li médium pomalu proudit, postupující teplo začne být unášeno [23] a v souladu s obrázkem 2.15a se bude více šířit ve směru proudění. Teplotní profil pak bude odpovídat křivce B a na snímačích bude zaznamenán rozdíl teplot  $\Delta T$ .



**Obrázek 2.14.** Teplotní profily v kalorimetrickém průtokoměru (převzato z [1])



**Obrázek 2.15.** Šíření tepla v kalorimetrickém průtokoměru

Když bude rychlost proudění větší než rychlost šíření tepla, jak je naznačeno na obrázku 2.15b, popisovaný efekt se vytratí. Teplotní snímač před vyhřívacím tělískem bude měřit teplotu protékající tekutiny bez ovlivnění vyhřívacím tělískem a teplotní snímač za vyhříváním pak samozřejmě teplotu tekutiny po ohřátí. Rozdíl teplot na snímačích tedy přesně odpovídá tomu o kolik se tekutina průchodem okolo tělíska ohřála. Pak začíná platit nepřímá úměra. Intuitivně ji lze chápat tak, že u rychleji proudící tekutiny jsou částice v kontaktu s tělískem kratší dobu a ohřejí se tedy méně. Přesnější je však vyjít z konstantního tepelného výkonu tělíska. Pak lze nepřímou úměru jednoduše odvodit, jako jsem to již udělal v rámci bakalářského projektu [17].

V jednoduchém odvození se dopouštím velkých zjednodušení a soustředím se pouze na to hlavní. Na plyn nahlížím jako na sérii infinitezimálně nízkých válečků (potrubí



budiž kruhového průřezu) každý o výšce  $d_0$  a hmotnosti  $m_0$  bude mít čas  $t_0$  kdy bude vyhříváné tělísko předávat tepelnou energii pouze jemu. Platí pak  $t_0 = d_0/v$ , kde  $v$  je rychlost proudění. Dodává-li vyhříváné tělísko výkon  $P$ , bude každému válečku dodaná energie  $Q = Pt_0$ . Která podle kalorimetrické rovnice způsobí ohřátí tohoto válečku o

$$\Delta T = \frac{Q}{m_0 c_p}.$$

Dosazením

- vyjádření hmotnosti z objemu a hustoty  $m_0 = S d_0 \rho$ , kde  $S$  je obsah plochy průřezu potrubí a  $\rho$  je hustota plynu,
- $d_0 = t_0 v$ ,
- a  $Q = Pt_0$

dostávám:

$$\Delta T = \frac{Pt_0}{S t_0 v \rho c_p} \quad \Rightarrow \quad S v = \frac{P}{\Delta T \rho c_p}.$$

Konečně podle vztahů z podsekcce 2.1.1:

$$S v = Q_V = \frac{P}{\Delta T \rho c_p}, \quad Q_m = \frac{P}{\Delta T c_p},$$

což se přesně shoduje s [13].

# Kapitola 3

## Rozbor problému

Touto kapitolou začíná tvůrčí část práce, v rámci níž budu realizovat měřič průtoku plynu, který bude pro měření používat kalorimetrickou metodu. Na začátku kapitoly ještě teoreticky ověřím možnost použití této metody pro danou aplikaci, ve zbytku se již budu věnovat přímo návrhu měřicího zařízení.

### 3.1 Možnost použití kalorimetrické metody pro malé průtoky CO<sub>2</sub>

Zadání mi dává za úkol měřit oxid uhličitý, po dohodě s vedoucím práce jsem se zaměřil na malé průtoky – řádově desítky až stovky mililitrů za minutu. Navázal jsem tak na bakalářský projekt [17], ve kterém se ukázalo, že realizovat měřicí zařízení, které by touto metodou měřilo průtoky pouhých jednotek mililitrů za minutu pravděpodobně nebude ve mně dostupných podmínkách reálné.

Co se týče oxidu uhličitého jakožto měřeného média, podle nejdůležitějších fyzikálních vlastností pro kalorimetrickou metodu, v čele s měrnou tepelnou kapacitou, uvedených v tabulce 3.1 je zřejmé, že pokud kalorimetrická metoda funguje pro měření průtoku vzduchu, měla by podobně spolehlivě fungovat i pro oxid uhličitý. Z chemických vlastností je vzhledem k zahřívání plynu v kalorimetrickém průtokoměru důležitá především malá reaktivita pro kterou není oxid uhličitý výbušný ani hořlavý [19].

	vzduch		oxid uhličitý	
	20 °C	50 °C	20 °C	50 °C
měrná tepelná kap. $c_p$ [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	1006		837	
hustota $\rho$ [kg · m <sup>-3</sup> ] (normální tlak)	1,205	1,093	1,815	1,643
kinematická viskozita $\nu$ [10 <sup>-5</sup> · m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]	1,51	1,79	0,81	0,98

**Tabulka 3.1.** Relevantní vlastnosti vzduchu a oxidu uhličitého (hodnoty z [3, 8–9])

Podle hlavních zdrojů [1, 6, 15] není výběr typu průtokoměru pro konkrétní aplikaci vůbec jednoduchý úkol. V mém případě je již metoda vybraná a postačí tedy ověřit opodstatněnost tohoto výběru. Podle tabulky 3.2 převzaté z [1] je kalorimetrická metoda jakožto jedna z tepelných metod pro tuto aplikaci (malý případně obecný průtok) vhodná. Kniha [6, s. 276] pak u tepelných průtokoměrů uvádí přímo: *Jsou vhodné pro (...) a především pro malé průtoky plynů* a dále: *K typickým aplikacím patří (...) měření analytických plynů (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> ...)* [s. 293]. Použitelnost potvrzuje i tabulka ze závěrečné části článku [15]. Článek dále uvádí, že kalorimetrická metoda je vhodná pro rozsah průtoků od 3 ml až po desítky litrů za minutu. Tuto sekci tedy uzavírám s tím, že vybraná metoda je pro aplikaci použitelná respektive vhodná.

průtok plynu → průtokoměr ↓	obecný (např. vzduchu)	malý (<20 l/min)	velký	horkého plynu (>200 °C)	páry
se škrťacím orgánem	✓	?	✓	✓	✓
Pitot, plováчковý	✓	✓			
terčíkový	?	✓			
turbínkový	✓	?		?	
vírový/fluidický	✓		?	✓	✓
elektromagnetický					
ultrazvukový	?			?	?
Coriolisův	✓	✓		?	?
tepelný	✓	✓	✓	?	
jiný (např. značkovací)	?	✓	?	✓	✓

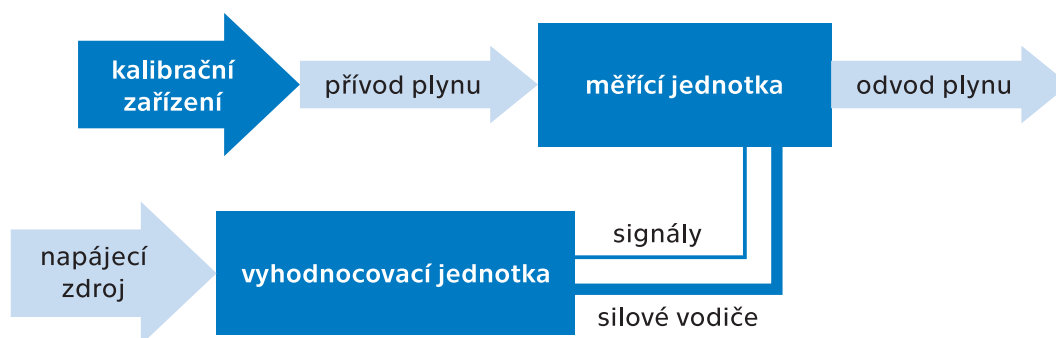
✓ = vhodné      ? = vhodné za určitých podmínek

**Tabulka 3.2.** Použití měřičů průtoku plynu (převzato z [1], přeloženo, upraveno)

### 3.2 Návrh měřicího zařízení

Nejprve dopřesním další parametry aplikace podle [6]. Zařízení by mělo být schopné měřit jak krátkodobě v laboratoři, tak i dlouhodoběji v řádu hodin, avšak dlouhodobý provoz nebude testován. Jak již bylo zmíněno v předchozí sekci, rozsah měření se předpokládá v desítkách a stovkách mililitrů za minutu. Ačkoliv kalorimetrická metoda měří primárně hmotnostní průtok, po přepočtu na průtok objemový si člověk lépe představí velikost jednotky. Požadovanou přesnost zadání nespecifikuje. Budu se samozřejmě snažit dosáhnout přesnosti co nejlepší, ale po zkušenosti z [17] se domnívám, že i dosažení přesnosti v řádu plus minus nízkých desítek procent z naměřené hodnoty by se dalo považovat za úspěch. Obdobná situace je s dynamickými vlastnostmi. Opět ze zkušenosti vím, že reakce na náběžnou hranu průtoku (průtok aplikovaný z klidového stavu) může být rychlá, reakce na sestupnou hranu je však výrazně delší.

Pro testování a kalibraci bude použito kalibrační zařízení, tzv. motorizovaná stříkačka, kterou jsem začal v bakalářském projektu vyvíjet a která bude v rámci této práce dokončena. Komerční průtokoměry se obvykle kalibrují dusíkem a výrobci pak uvádějí korekční koeficienty [6–7]. Ovšem vzhledem k mým pracovním podmínkám, ve kterých je jak čistý dusík tak i oxid uhličitý omezeně dostupný a hůře se s nimi manipuluje, bude prvotní testování prováděno se vzduchem.



**Obrázek 3.1.** Blokové schéma měřicího systému

Na konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že měřicí zařízení se bude skládat z fyzicky oddělené měřicí a vyhodnocovací jednotky. Ty pak budou propojeny silovými a signálovými vodiči. Na obrázku 3.1 je tomu odpovídající blokové schéma celého měřicího systému. Obě jednotky budou podrobeny konkrétnímu rozboru v následujících podsekcích.

### 3.2.1 Měřicí jednotka

Základem od kterého se celá měřicí jednotka odvíjí je potrubí, kterým bude oxid uhličitý proudit. V přípravném projektu jsem používal trubičku s vnitřním průměrem 5 mm, zařízení však začínalo měřit až přibližně na průtoku 100 ml/min. Pro dosažení větší citlivosti by bylo potřeba užít trubičky s menším průměrem, v níž by při stejném průtoku proudil plyn rychleji. Menší průměr však začíná výrazně limitovat možnosti umístění teplotních snímačů a vyhřívacího tělíska uvnitř trubičky. Existuje sice i varianta vnějšího snímání a ohřívání, ale podle [6] je toto řešení poznamenané menší přesností a větší časovou konstantou. V této práci jsem tedy zvolil kompromis – trubičku s vnitřním průměrem 2 mm s tím, že snímače teploty budou uvnitř a ohřívání bude zevnějšku.

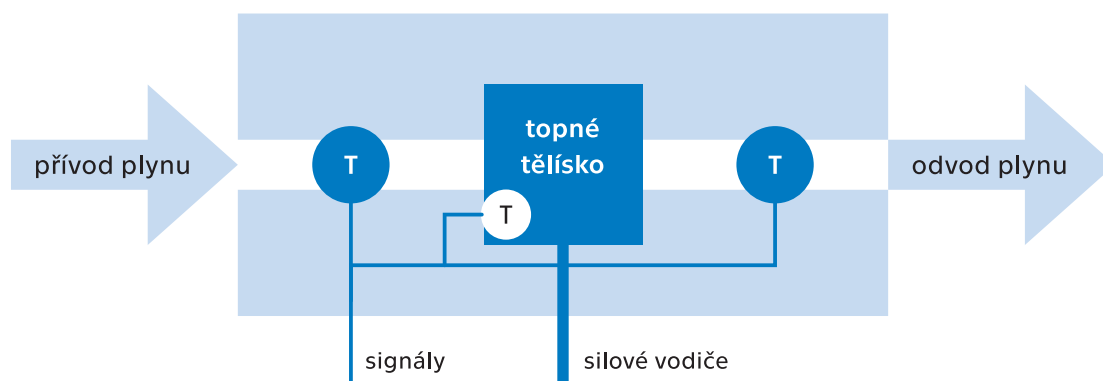
Podle vypočtených Reynoldsových čísel pro průtoky 10 ml/min a 500 ml/min:

$$\text{Re} = \frac{\bar{v}d}{\nu} = \frac{Q_V d}{S \nu} = \frac{Q_V d}{\frac{1}{4}\pi d^2 \nu} = \frac{4 Q_V}{\pi d \nu} = \frac{4 \cdot \frac{1}{6} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \doteq 13,$$

$$\text{Re} = \frac{4 Q_V}{\pi d \nu} = \frac{4 \cdot \frac{50}{6} \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 0,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \doteq 655,$$

lze usuzovat, že proudění oxidu uhličitého ve zvolené trubičce bude laminární. Víry by mohly vznikat pouze za snímači teploty, které budou v potrubí tvořit překážky.

Jako snímače teploty jsem se rozhodl ponechat NTC termistory, které se v přípravném projektu osvědčily. Jsou sice nelineární, ale závislost lze aproximovat. Citlivost je velká a náklady na pořízení velmi malé [16]. Jedná se o kusy o odporu 10 k $\Omega$  při teplotě 25 °C, v provedení SMD v pouzdře 0603, které má rozměry pouhých 0,6 × 0,3 × 0,3 mm. Díky svojí miniaturní velikosti mají minimální tepelnou kapacitu, výrobce udává jejich tepelnou časovou konstantu <5 s [27]. S umístěním jednoho termistoru se počítá i na vyhřívacím tělísku, jak je vidět na blokovém schématu měřicí jednotky na obrázku 3.2. Prostřednictvím tohoto termistoru bude kontrolována teplota tělíska a bude případně zamezeno přehřátí.

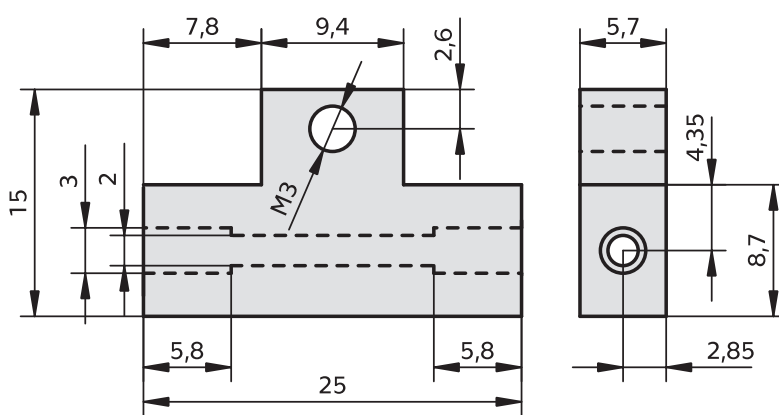


**Obrázek 3.2.** Blokové schéma měřicí jednotky (T = snímače teploty)

Pro vyhřívání topného tělíska jsem vybral výkonové rezistory v pouzdře TO220. Toto pouzdro je velmi běžné u tranzistorů a dalších součástek, ale u rezistorů běžné není. Výběr hodnot rezistorů byl tedy značně limitován dostupností – rozhodl jsem se pro dva kusy o odporu  $0,22 \Omega$  s maximálním ztrátovým výkonem  $35 \text{ W}$ , které budou spojeny do série. Aby tato hodnota nebyla přesažena, bude je tedy možné napájet maximálně napětím

$$U_{\max} = 2\sqrt{35 \text{ W} \cdot 0,22 \Omega} \doteq 5,5 \text{ V}.$$

Samotné tělísko jsem potom navrhnul jako poměrně sofistikovaný chladič pro tyto rezistory. Bude zhotoveno z hliníku podle výkresu na obrázku 3.3. Jeden rezistor bude umístěn zepředu, druhý zezadu, drženy budou společným šroubem v díře s metrickým závitem M3 za chladicí křídélka.



**Obrázek 3.3.** Výkres navrženého vyhřívacího tělíska (rozměry v mm)

Ačkoliv jsem ohřívání označil za vnější, jelikož zvolená plastová trubička nebude dobře tepelně vodivá, je vyhřívací tělísko navrženo tak, aby se ohřátý hliník dostal do přímého kontaktu s plynem. Trubička tak bude vložena pouze do části podélné díry zvětšené na průměr 3 mm, na zbylé délce přibližně 13 mm pak bude stěna potrubí tvořena přímo tělískem.

Celá měřicí jednotka bude zapouzdřena do 3D-vytištěné krabičky, kterou navrhnu až ve fázi stavby. Potrubí a vyhřívací tělísko budou tepelně izolovány, aby bylo měření co nejméně ovlivňováno okolními teplotními výchyly. Dále aby velký napájecí proud výkonových rezistorů rušil měřené napětí na termistorech co nejméně, budou signálové a silové vodiče vyvedeny zvlášť. Pro připojení na kabely budou použity vhodné konektory.

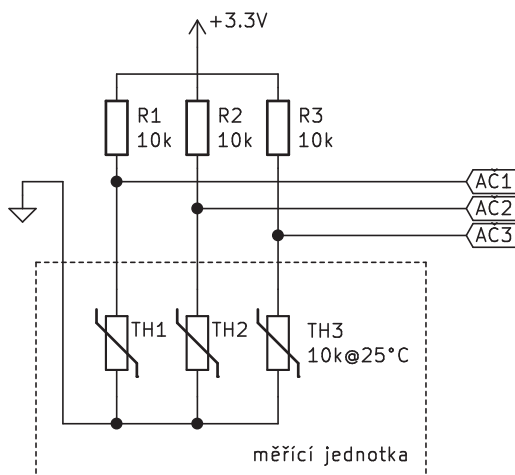
### ■ 3.2.2 Vyhodnocovací jednotka

Zaměřím se nejprve na měřicí obvod. Jak jsem již napsal v podsekcí 2.4.5, literatura se shoduje na tom, že k vyhodnocení průtoku kalorimetrickým průtokoměrem je vhodné odporové teplotní snímače zapojit do plného můstku a napětí z měřicí diagonály zesílit. Ovšem vzhledem k tomu, že:

- Jak jsem v této podsekcí dále popsal, shoda na předpisu závislosti hmotnostního průtoku na rozdílu teplot na snímačích v literatuře nepanuje a není tedy jasné jakou závislost očekávat;

- Použití napětí na měřicí diagonále jakožto rozdílu teplot (třebaže nelineárně) nebere v potaz absolutní teplotu (např. při dvojici teplot 20 a 25 °C a dvojici 55 a 60 °C by byl výstup z můstku jiný);
- Ze zkušeností z bakalářského projektu vím, že zesílení napětí není s mně dostupným analogově-číslíkovým převodníkem potřeba,

rozhodl jsem se i v této práci pro velmi jednoduché zapojení, jehož schéma je na obrázku 3.4. Termistory jsou ve třech děličích napětí, jejichž výstupy jsou pak signály AČ1–AČ3 přivedeny na analogově-číslíkový převodník v procesoru, jehož použití je zamýšleno. Při použití napájecího napětí 3,3 V, které odpovídá vstupnímu rozsahu převodníku, bude při 25 °C každou větví protékat  $3,3 \text{ V} / 20 \text{ k}\Omega = 0,17 \text{ mA}$ , což je v souladu s [27]. Filtrace signálů bude řešena softwarově – průměrováním. Ochranné diody zapojené v závěrném směru mezi napájením a výstupem děliče a mezi výstupem děliče a zemí jsou již součástí procesoru [29].

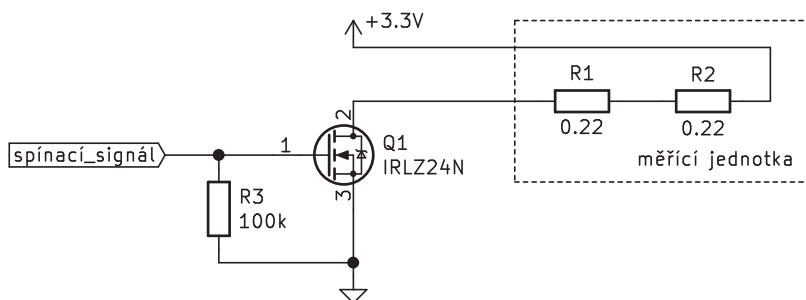


**Obrázek 3.4.** Elektrické schéma jednoduchého měřicího obvodu

Další funkčnost, kterou musí vyhodnocovací jednotka poskytnout je spínání vyhřívacího tělíska. To musí být jednak možné vypnout úplně, pokud by mělo dojít k přehřátí, jednak i pro běžnou činnost určitě nebude dodáván plný výkon 70 W při napájení 5,5 V či 25 W při 3,3 V. Místo toho bude vyhřívací tělísko spínáno pulzně-šířkovou modulací, čímž bude docíleno efektivní hodnoty výkonu pravděpodobně v jednotkách wattů. Jako logické se pak tedy jeví volit nižší napájecí napětí 3,3 V, při kterém bude mít signál pulzně-šířkové modulace větší střídu.

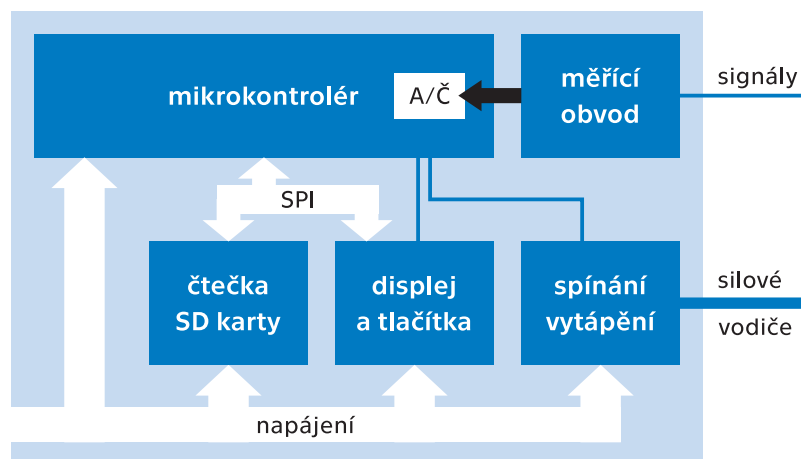
Jelikož bude do výkonových rezistorů téci proud v řádu jednotek ampér, je pro spínání jasnou volbou unipolární tranzistor MOSFET. Konkrétně jsem vybral typ IRLZ24N od výrobce Infineon v pouzdře TO220AB, určený pro maximální spínaný proud 18 A, maximální ztrátový výkon 45 W, s prahovým napětím v rozmezí 1–2 V a s odporem  $R_{DS(ON)}$  přibližně 0,1  $\Omega$  [28]. Po jeho sepnutí tak bude do vyhřívacího tělíska téci proud přibližně  $3,3 \text{ V} / 0,54 \Omega \doteq 6,1 \text{ A}$  a ztrátový výkon na tranzistoru bude činit  $(6,1 \text{ A})^2 \cdot 0,1 \Omega \doteq 3,7 \text{ W}$ . Je tedy nutné počítat s adekvátním chlazením.

Vyhodnocovací jednotka bude řízena mikrokontrolérem, jehož součástí jsou i zmínované analogově-číslíkové převodníky. Počítám s využitím procesoru STM32F042F6P6, se kterým jsem se seznámil ve školních laboratořích a mám jej k dispozici. V aktuálním nedostatku křemíkových polovodičů je možnost výběru prakticky nulová.



**Obrázek 3.5.** Elektrické schéma spínání topného tělíska

Zadání požaduje, aby byl měřicí systém schopný měřené hodnoty zobrazovat a archivovat. Pro archivaci jsem zvolil možnost ukládání na SD kartu, vyhodnocovací jednotka tedy bude vybavena čtečkou. Za účelem zobrazení pak bude osazen drobný jednobarevný OLED displej s rozlišením  $128 \times 64$  pixelů s několika tlačítky pro ovládání zařízení. Komunikace mezi mikrokontrolérem a SD kartou a mezi mikrokontrolérem a displejem bude probíhat po sběrnici SPI. Blokové schéma celé vyhodnocovací jednotky je na obrázku 3.6.



**Obrázek 3.6.** Blokové schéma vyhodnocovací jednotky

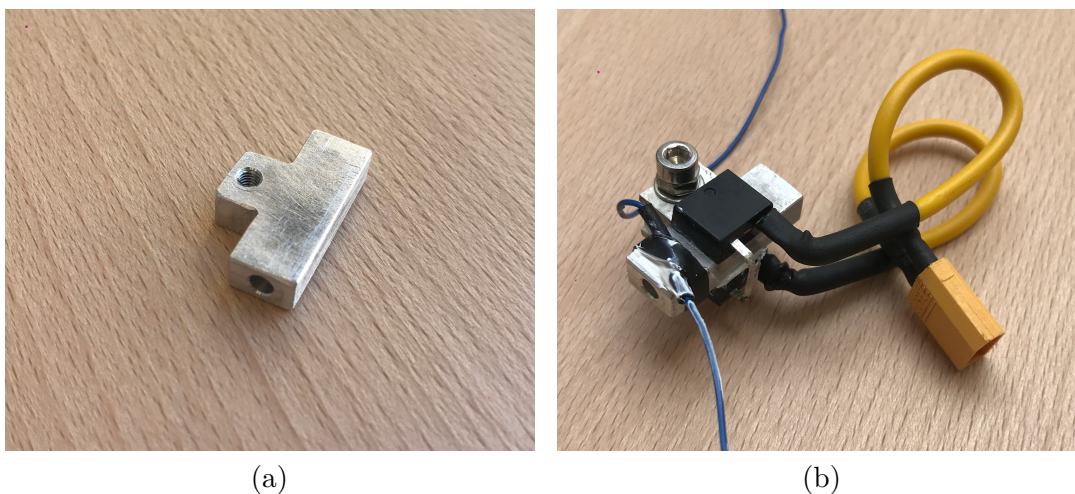
## Kapitola 4

### Stavba měřicího systému

Tato kapitola bude dokumentovat výrobu a ve stručnosti implementaci softwaru. Je rozdělena do sekcí podle jednotlivých částí měřicího systému.

#### 4.1 Měřicí jednotka

Na obrázku 4.1a je vyhřívací tělísko zhotovené z hliníku podle výkresu ze stránky 17 před osazením, kdy mělo hmotnost 3,75 g. Tělísko po osazení je pak vyfotografované na obrázku (b). Na styčné plochy tělíska a výkonových rezistorů byla nanášena teplovodivá pasta. Následně byly rezistory přišroubovány a propojeny do série. Pro jejich připojení ke konektoru bylo s ohledem na vypočítaný napájecí proud přibližně 6,1 A užito splétaných vodičů o průřezu 1,5 mm<sup>2</sup>. Použitý napájecí konektor je dvoupinový typu XT30 a podle výrobce snese proudové zatížení až 15 A.

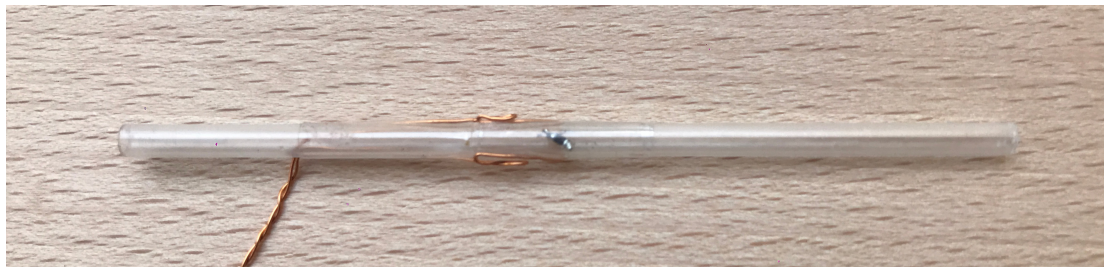


**Obrázek 4.1.** Zhotovené vyhřívací tělísko

Termistor jehož osazení bylo původně zamýšleno byl nakonec z konstrukčních důvodů nahrazen jiným kusem o odporu 100 kΩ při 25 °C v o něco větším pouzdře 0805. Na tělísko byl uchycen smršťovací bužírkou do které byla také nanášena teplovodivá pasta.

Následoval nelehký úkol osazení termistorů do vybrané trubičky z čirého ABS plastu o vnitřním průměru 2 mm a síle stěny 0,5 mm. Přibližně 41 mm od konce trubičky určeného k zasunutí do vyhřívacího tělíska byl skrz trubičku kolmo k její ose vyvrtán 0,5mm otvor. Skrz otvory ve stěnách a dále trubičkou ven byly provlečeny dva měděné lakované dráty průměru 0,3 mm. Vně trubičky byl na konce těchto drátů připájen termistor a následně byl za opačné konce drátů opatrně vtažen do trubičky. V místě s otvory byla trubička oblepena průhlednou lepící páskou za účelem minimalizace úniku plynu mimo potrubí. Výsledek této práce je vidět na obrázku 4.2.





**Obrázek 4.2.** Jedna část trubičky osazená termistorem

Pro zakončení drátů z termistorů jsem zvolil kulatý čtyřpinový DIN konektor, který má kovové tělo a je tím pádem vhodný pro stíněný kabel. Země všech tří termistorů jsem propojil na jednom pinu, který jsem spojil i se stíněním.

Krabičku pro měřicí jednotku jsem navrhnul k vytištění na 3D tiskárně (model je součástí elektronických příloh C). Jak je vidět na obrázku 4.3, krabička je koncipována tak, aby bylo okolo trubičky i vyhřívacího tělíska možné napěchovat dostatek vaty jakožto tepelné izolace. Šroub který drží výkonové rezistory slouží i pro přidržení topného tělíska v rámci krabičky, jeho konec je totiž zašroubován do sloupku na dně krabičky. Ze dna pak vycházejí ještě další dva držáky po stranách topného tělíska skrz které prochází trubička. Přední stěna krabičky je zesílená kvůli uchycení konektorů. Po finálním usazení všech komponent avšak před napěchováním vaty byla trubička a napájecí konektor zalepeny epoxidovým lepidlem.



**Obrázek 4.3.** Měřicí jednotka usazená v krabičce

## 4.2 Vyhodnocovací jednotka

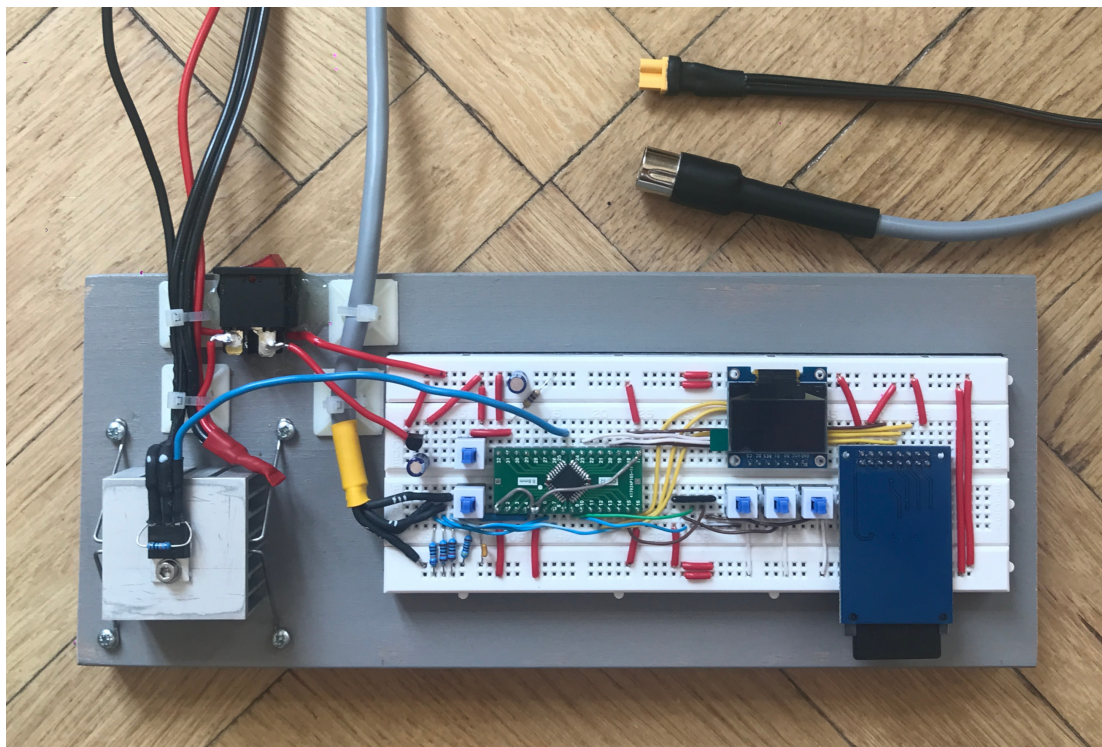
### 4.2.1 Hardware

Hlavní změnou na postavené vyhodnocovací jednotce oproti návrhu z podsekcce 3.2.2 je výměna mikrokontroléru. Ukázalo se totiž, že Flash paměť kontroléru STM32F042F6P6 o velikosti 32 kB není dost velká pro knihovny, které jsem vybral na čtení analogových vstupů a zápis na SD kartu. Byl tedy nahrazen typem STM32L072KZT6, jehož Flash paměť má velikost 192 kB [26, 29]. Ke drobné změně došlo také v jedné větvi napětového děliče v měřicím obvodu, která adekvátně reagovala na změnu jednoho ze tří termistorů při stavbě měřicí jednotky.

Displej, čtečka SD karet a procesor jsou propojeny společnou sběrnicí SPI. Vzhledem k připojení dvou podřazených zařízení (Slave) jsou potřeba i signály Chip Select. Dva dodatečné digitální signály jsou připojeny k displeji mimo sběrnic, a to pro reset a rozlišení příkazů/dat. Tři tlačítka pro ovládání zařízení uživatelem jakožto digitální vstupy jsou řešena klasickým způsobem s Pull-down rezistorem [21], jedná se konkrétně o síť  $4 \times 10 \text{ k}\Omega$ , s jedním rezistorem nevyužitým.

Silový propoj měřicí a vyhodnocovací jednotky zajišťuje splétaná dvoulinka navazující na průřez vnitřních vodičů měřicí jednotky, tj.  $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$ . Pro připojení termistorů jsem pak vybral ovládací kabel F-CY-OZ se třemi žilami o průřezu  $0,5 \text{ mm}^2$  a stíněním.

Celkové schéma měřicího zařízení doplněné o několik drobných dosud neokomentovaných prvků (např. blokovací kondenzátory) tvoří přílohu A. Na rozdíl od měřicí jednotky, která se dá považovat za hotový výrobek, jednotka vyhodnocovací bohužel kvůli nedostatku času dospěla pouze do stádia funkčního vzorku, o jehož vizáži poskytne představu obrázek 4.4.



**Obrázek 4.4.** Vyhodnocovací jednotka jako funkční vzorek

V nepájivém poli je kromě měřicího zařízení i obvod pro nahrávání softwaru do mikrokontroléru. Červeno-černý vypínač pak slouží k odpojení výkonové části obvodu při nahrávání softwaru, kdy k napájení slouží USB, které by přibližně šestiampérové proudové zatížení nesneslo. Z dalšího si komentář zaslouží asi už jen tranzistor spínající výkonové rezistory, který je vzhledem k vypočítanému ztrátovém výkonu osazený na hliníkový chladič ze starého počítače doplněný závitovou dírou M3.

## 4.2.2 Software

Kontrolér jsem programoval v jazyce C++. Pro vývoj a kompilaci jsem si vybral on-line nástroj Mbed Compiler, který zároveň poskytuje užitečnou knihovnu s mnoha základními objekty pro programování mikrokontrolerů. Nejedná se sice o profesionální nástroj, ale v tomto případě pro jednoduchý program postačí.

Kromě knihovny `mbed` ve verzi 2 jsem použil ještě knihovnu pro ovládání použitého OLED displeje od společnosti Adafruit Industries, kterou jsem však zásadním způsobem upravil, abych zmenšil velikost kódu. Pro zápis na SD kartu pak byla použita rozšiřující knihovna `SDFFileSystem` z rodiny Mbed. Tuto knihovnu jsem pro potřeby měřicího zařízení poupravil pouze drobně. Prvním zásahem bylo nahrazení dílčí knihovny `FATFileSystem` upravenou verzí kvůli problémům s kompatibilitou. Druhá úprava se pak týkala přímo třídy `SDFFileSystem` a to konkrétně jejího konstruktora, který jsem modifikoval tak, aby třída převzala již vytvořenou instanci sběrnice SPI, která bude v programu sdílená, namísto toho aby si konstruovala instanci svoji privátní. Samotný kód jsem se pak pro jeho jednoduchost rozhodl nijak nedělit a umístit jej všechen přímo do souboru `main.cpp`, ze kterého okomentuji několik důležitých částí.

Na začátek shrnu všechny vstupy a výstupy se kterými procesor pracuje. Celkem je vstupních či výstupních pinů využito 14 a to následujícím způsobem:

- 3+2 piny pro sběrnici SPI (signály MOSI, MISO, SCLK, 2×CS)
- 2 piny pro ovládání displeje navíc ke sběrnici (signál pro reset a rozlišení příkazů/dat)
- 3 piny pro čtení tlačítek – je užito třídy `InterruptIn`
- 3 piny pro čtení (AČ převod) výstupních napětí měřicího obvodu – je užito `AnalogIn`
- 1 pin pro spínání vyhřívacího tělíska pulzně-šířkovou modulací – třída `PwmOut`.

Po jejich inicializaci se ve funkci `main()` spustí časovač `Timer`, který bude s periodou 50 ms vyvolávat přerušování. Veškeré další operace pak budou spouštěny prostřednictvím těchto přerušování a přerušování vyvolanými stisknutím některého z tlačítek, funkce `main()` totiž dále přechází do prázdné nekonečné smyčky.



Obrázek 4.5. Uživatelské rozhraní měřicího zařízení

Tlačítkami je možné ovládat jednoduché uživatelské rozhraní, jehož ukázka je na obrázku 4.5. U horního okraje hlavního displeje (na obrázku vlevo) je stavová lišta, ve které se zobrazuje teplota tělíska, měřený rozdíl teplot a zvolené médium. Níže je pak informace o měřeném průtoku, zápisu měřených dat na SD kartu a u dolního okraje jsou

popisky tlačítek. Levým tlačítkem se ovládá zápis na SD kartu, prostředním tlačítkem se provádí kalibrace nuly a stisknutí pravého tlačítka vyvolá nabídku s možností volby měřeného média (na obrázku uprostřed a vpravo).

Co se týče přerušení vyvolaných časovačem, po každé se přečtou a uloží hodnoty analogových vstupů a v každém pátém přerušení tj. každých 250 ms je volaná funkce `processTemperatures()` pro zpracování naměřených hodnot. Ta vypočítá ze tří sad po pěti hodnotách průměry, ovládá vyhřívané tělísko a stanovuje měřený průtok – tomu jak konkrétně je toto prováděno se věnují sekce 5.2 a 5.3 následující kapitoly. V případě že je zapisování na SD kartu spuštěno, provede tato funkce ještě zápis času a měřeného průtoku do předem připraveného textového souboru.

Samostatný komentář si zaslouží ještě způsob výpočtu měřených teplot z napětí na jednotlivých děličích v měřicím obvodu, k čemuž slouží funkce `relativeVoltageToTemperature(...)`. Nejprve je vypočítán odpor termistoru podle vzorce:

$$\text{thermistorResistance} = \frac{\text{relativeVoltage} \cdot \text{passiveResistance}}{1 - \text{relativeVoltage}},$$

který je odvozen ze základní rovnice pro výstup napěťového děliče:

$$3,3 \text{ V} \cdot \text{relativeVoltage} = 3,3 \text{ V} \cdot \frac{\text{thermistorResistance}}{\text{thermistorResistance} + \text{passiveResistance}},$$

kde:

- `relativeVoltage` je měřené napětí vůči vstupnímu rozsahu AČ převodníku,
- 3,3 V je napájecí napětí děliče a zároveň vstupní rozsah převodníku,
- `thermistorResistance` je odpor termistoru,
- `passiveResistance` je odpor rezistoru v děličích.

Teplotu pak procesor vypočítá s využitím Steinhart-Hartovy rovnice pro NTC termistor:

$$T = [A + B \cdot \ln(R) + C(\ln(R))^3]^{-1}, \quad [16]$$

přičemž:

- $T$  je teplota (termodynamická),
- $A, B, C$  jsou Steinhart-Hartovy koeficienty (rozměru teplota<sup>-1</sup>),
- $R \cdot 1 \Omega$  je odpor termistoru – ve značení kódu `thermistorResistance`.

Steinhart-Hartovy koeficienty pro použité termistory jsou uvedené v tabulce 4.1. Získal jsem je s pomocí on-line kalkulačky<sup>1</sup>, do které jsem zadal vždy sadu tří hodnot odpor–teplota. Pro první typ termistoru jsou tato data k dispozici v tabulce na webu výrobce<sup>2</sup>, u druhého typu bylo nutné odečítat z grafu v dokumentaci [27].

termistor	Steinhart-Hartovy koeficienty [K <sup>-1</sup> ]		
	A	B	C
na vyhřívání (100 kΩ)	6,906 × 10 <sup>-4</sup>	2,226 × 10 <sup>-4</sup>	6,580 × 10 <sup>-8</sup>
v trubičce (10 kΩ)	1,068 × 10 <sup>-3</sup>	2,463 × 10 <sup>-4</sup>	2,295 × 10 <sup>-8</sup>

**Tabulka 4.1.** Steinhart-Hartovy koeficienty užitých termistorů

Kompletní zdrojový kód zařízení je součástí elektronických příloh (C).

<sup>1</sup> <https://www.thinksrs.com/downloads/programs/therm%20calc/ntccalibrator/ntccalculator.html>

<sup>2</sup> <https://www.vishay.com/thermistors/ntc-rt-calculator/>

### 4.3 Kalibrační zařízení – motorizovaná stříkačka

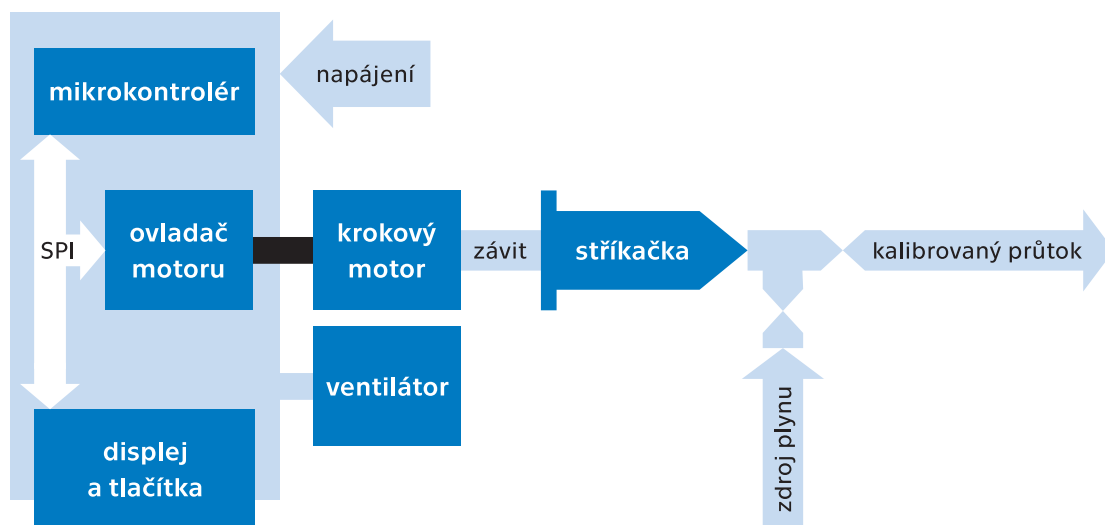
Ačkoliv dospěla motorizovaná stříkačka, na rozdíl od vyhodnocovací jednotky měřicího zařízení, do stádia hotového výrobku, nebyla její stavba primárním cílem práce, ale pouze prostředkem pro možnost testování a provedení ověřovacího měření. Budu ji tedy dokumentovat poněkud stručněji, především ukázkou fotografií.

Základní princip tohoto zařízení je jasný. Píst stříkačky není mačkán ručně, je poháněn krokovým motorem s rozlišením 200 kroků na otáčku. Převod rotačního pohybu na lineární je řešen trapézovým závitem se stoupáním 2 mm na otáčku. Pracovní dráha pístu stříkačky o objemu 50 respektive 60 mililitrů je dlouhá 97 mm. Otočením hřídele motoru o jeden krok je tak ze stříkačky vyfouknuto

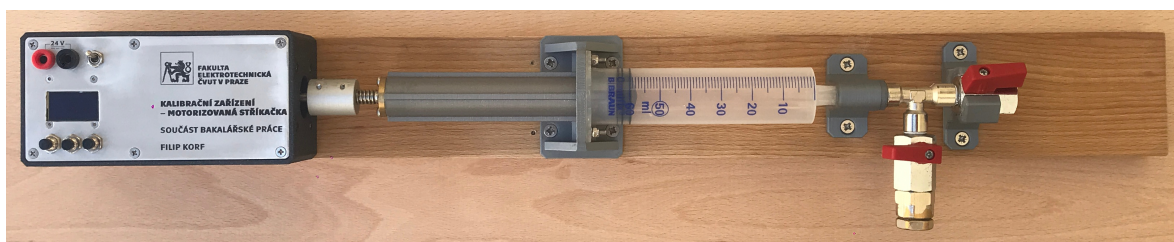
$$\frac{2 \text{ mm/otáčku}}{200 \text{ kroků/otáčku}} \cdot \frac{1}{97 \text{ mm}} \cdot 60 \text{ ml} \cdot 1 \text{ krok} \doteq 6,2 \text{ mm}^3.$$

Krokováním motoru v různě dlouhých periodách tak lze vytvořit různé objemové průtoky. V procesoru, který celé zařízení řídí, je konkrétně naprogramovaná tabulka pro průtoky 10–400 ml/min.

Pro možnost použití médií jiných než vzduch je za stříkačkou zařazen člen T se dvěma kohoutky, z nichž jeden je určen pro připojení zásobníku plynu, druhý je pak výstupem s kalibrovaným průtokem. Na obrázku 4.6 je celé zařízení znázorněné v blokovém schématu, na obrázku 4.7 je pak celkový pohled na výrobek.



Obrázek 4.6. Blokové schéma motorizované stříkačky



Obrázek 4.7. Celkový pohled na motorizovanou stříkačku

Základnu zařízení tvoří bukový práh o rozměrech přibližně  $62 \times 7 \times 2$  cm, na kterém je stříkačka upevněna pomocí 3D-vytištěných držáků. Píst stříkačky byl již v rámci přípravného bakalářského projektu nahrazen pístem jiným, taktéž 3D-vytištěným, do jehož dutiny může zajíždět závitová tyč.

Nejsofistikovanější částí zařízení je pak krabička s ovládacím panelem, uvnitř které je zapouzdřen krokový motor, ventilátor pro chlazení i veškerá elektronika. Ovládací panel jsem vyrobil z 2 mm tlustého hliníkového plechu. Je osazen stejným typem displeje jako vyhodnocovací jednotka a také třemi tlačítky pro ovládání. V horní části se pak nachází zdířky pro připojení stejnosměrného napájení 24 V a vypínač. Detail ovládacího panelu je na obrázku 4.8. Na obrázku 4.9 je několik snímků uživatelského rozhraní, které je koncipováno podobně jako u vyhodnocovací jednotky.



**Obrázek 4.8.** Detail ovládacího panelu

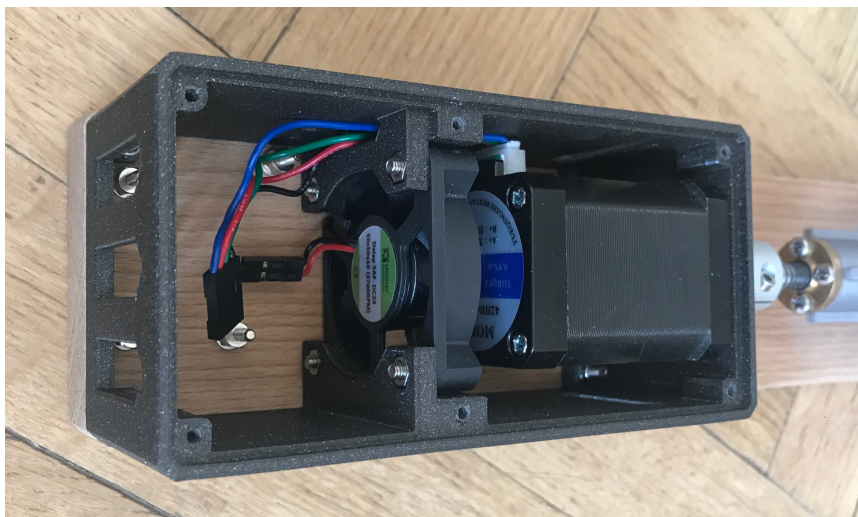


**Obrázek 4.9.** Uživatelské rozhraní motorizované stříkačky

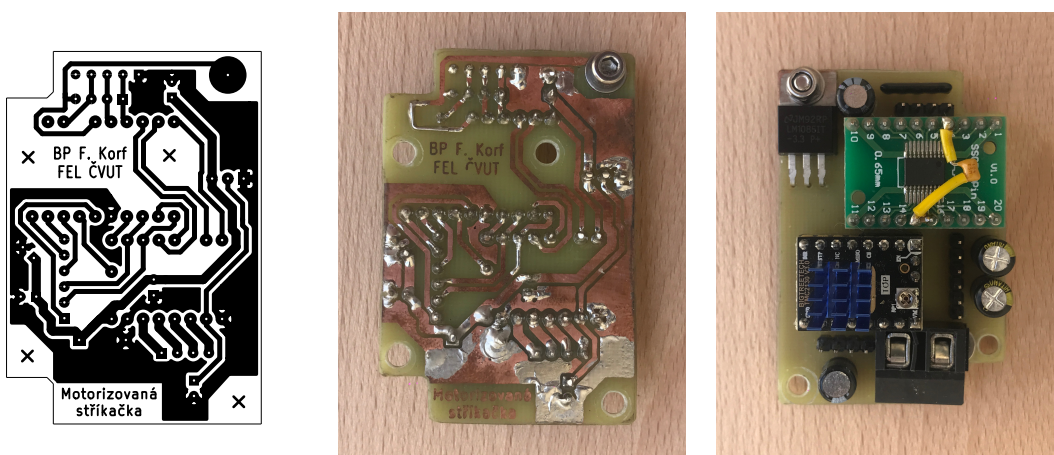
Po zkušenosti z přípravného projektu, ve kterém jsem se snažil stříkačku pohánět menším krokovým motorem s maximálním točivým momentem 0,12 Nm, což bylo nedostatečné, jsem se rozhodl pro motor se stejnou přírubou (NEMA17) avšak větší výškou, který má podle výrobce při proudu 1,2 A moment až 0,9 Nm. Na obrázku 4.10 je možné vidět, jak je motor uvnitř krabičky usazen.

Co se elektroniky týče, zařízení řídí procesor STM32F042F6P6. Pro ovládání krokového motoru pak slouží ovladač TMC2130 od výrobce Trinamic na adaptéru od výrobce BigTreeTech, který s procesorem komunikuje na sběrnici SPI. Schéma elektroniky tvoří přílohu B. V domácích podmínkách jsem pro elektroniku zhotovil jednostranný plošný spoj (na obrázku 4.11), který sám o sobě obsahuje minimum součástek a jeho hlavní role spočívá v propojení částí, které jsou umístěny mimo desku.

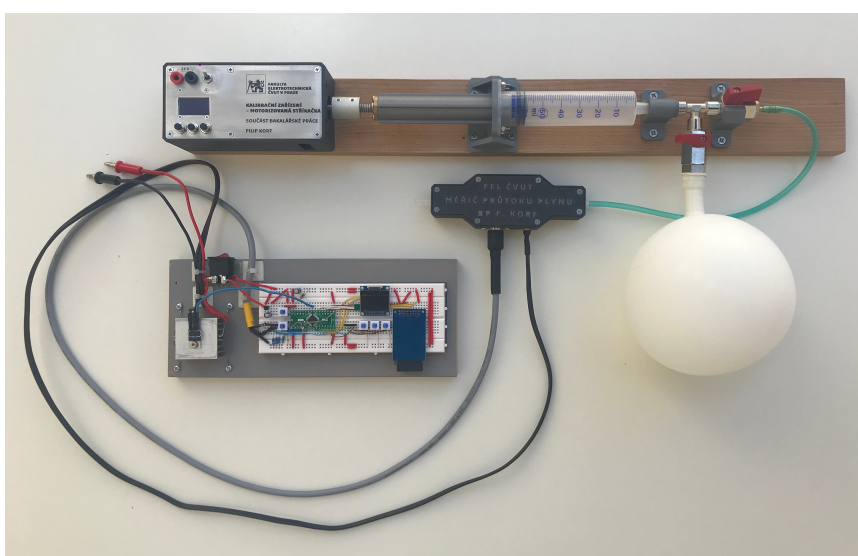
Poslední obrázek (4.12) této kapitoly pak zachycuje všechny součásti měřicího systému dohromady.



**Obrázek 4.10.** Náhled do krabičky motorizované stříkačky



**Obrázek 4.11.** Navržená a zhotovená DPS pro elektroniku motorizované stříkačky



**Obrázek 4.12.** Pohled na celý měřicí systém

# Kapitola 5

## Provedená měření

### 5.1 Prvotní testování

Když jsem začal měřicí systém prvotně testovat, výstupem vyhodnocovací jednotky samozřejmě ještě nebyl objemový průtok, nýbrž rozdíl měřených teplot na termistorech před a za tělískem. Pro úplně první testy jsem nastavil střidu pulzně šířkové modulace kterou se spíná vyhřívání na 0,1. Třetím termistorem umístěným na tělisku vyhodnocovací jednotka hlídala, že bude jeho teplota v rozmezí 45–55 °C. Je důležité říci, že se v tomto případě nejedná o regulaci, kde by byla snaha teplotu tělíska přesně řídit. Jak již bylo rozebráno, konkrétně se na závislosti  $Q_m(\Delta T)$  literatura neshodne, shodne se však na tom, že co se vyhřívání týče, vystupuje v závislosti parametr  $P$  jakožto dodávaný výkon, nikoliv teplota tělíska. Stoupne-li tedy teplota nad 55 °C, procesor výkonovou větev vypne (na principu tzv. bang-bang regulátoru) avšak jelikož po dobu kdy není výkon dodáván, není měření směrodatné, je výstupem hodnota N/A. Je-li teplota pod spodní hranicí, má se za to, že se tělísko ještě neprohřálo a měření by taktéž směrodatné nebylo.

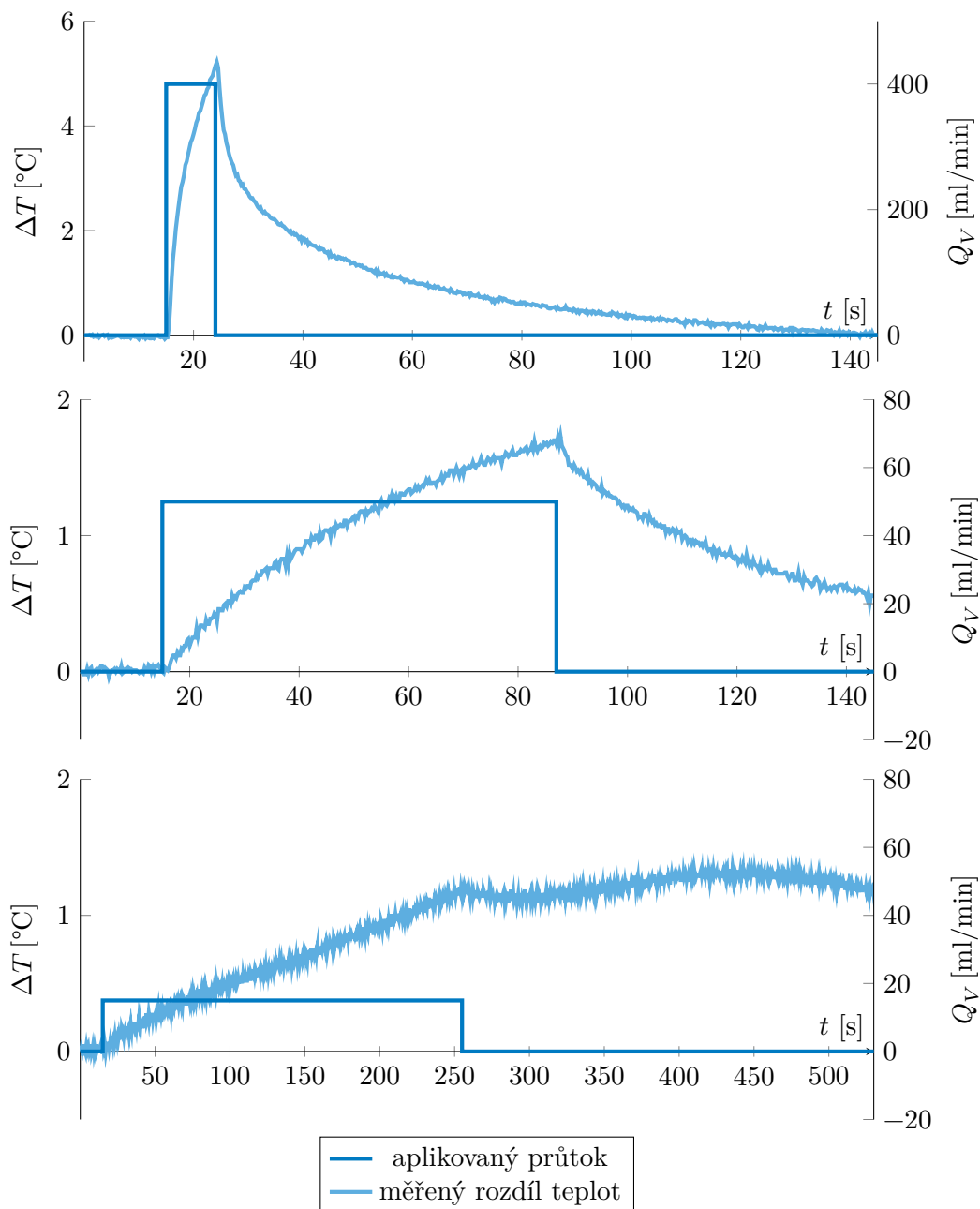
Testovací měření jsem zahájil vždy kalibrací nuly – tedy vynulováním rozdílu teploty při nulovém průtoku. Po 15 sekundách klidu jsem pak spouštěl motorizovanou stříkačku. Na časovém průběhu vůbec prvního provedeného testu s možností zápisu dat na SD kartu, který je na obrázku 5.1 nahoře je vidět, že měřič na náběžnou hranu spuštěného průtoku z motorizované stříkačky reaguje rychle, ale během pouhých 9 s, po které dokáže stříkačka dodávat průtok 400 ml/min, se v žádném případě nestihne ustálit. Ve zbytku průběhu po skončení průtoku ze stříkačky je pak vidět, že obnova symetrického tepelného profilu z  $\Delta T$  přibližně 5 °C trvala asi 2 minuty.

V dalších testech jsem tedy přešel k nižším průtokům 50 a 15 ml/min, které stříkačka dokáže dodávat déle. Jak je vidět na obrázku 5.1 uprostřed a dole, výsledky těchto testů byly velmi špatné. Nebylo dosaženo ani ustálené hodnoty při spuštěném průtoku ani následné obnovy tepelného profilu. V průběhu pro průtok 15 ml/min je velmi dobře vidět projev integračního charakteru měřiče.

Zjistil jsem, že problémy způsobovala vata zamýšlená jako tepelná izolace měřicí jednotky. Při aplikovaném průtoku trvajícím desítky sekund stihnul vychýlený teplotní profil prostoupit skrz stěnu trubičky do vaty, ta pak teplo akumulovala a zamezila nebo minimálně zpomalila obnovu symetrického tepelného profilu uvnitř trubičky. O něco lepších výsledků jsem dosáhnul po vyjmutí vaty, znaky integračního charakteru však v měřiči přetrvávaly. Rozhodl jsem se tedy vyzkoušet zcela opačný extrém než trubičku izolovat – otevřít víčko měřicí jednotky a trubičku zvenku ofukovat počítačovým ventilátorem, jak ukazuje obrázek 5.2 na straně 30.

Jelikož ventilátor chladil nejen trubičku, ale samozřejmě i tělísko, bylo nutné sedminásobně zvýšit výkon nastavením střidy 0,7. Rozsah povolených teplot tělíska byl rozšířen a tepelný i chladič výkon se vyrovnaly při teplotě přibližně 62 °C. S touto konfigurací začalo být dosahováno nesrovnatelně lepších výsledků.

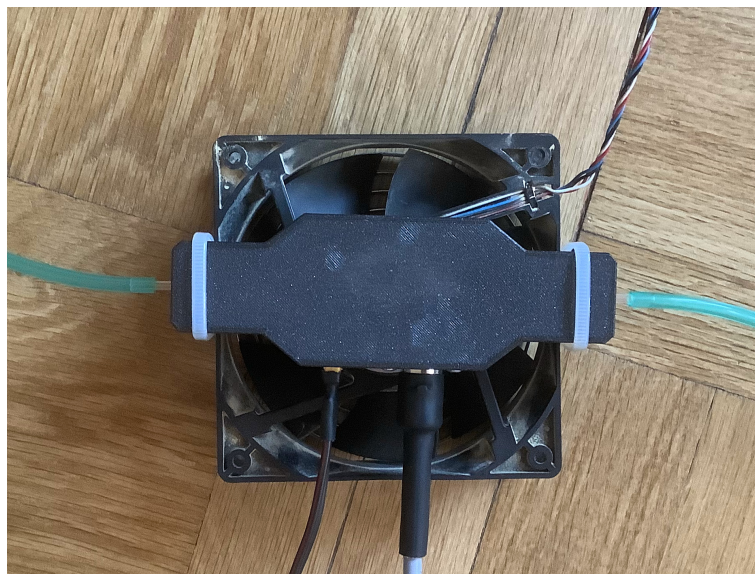




**Obrázek 5.1.** Časové průběhy prvotního testování

Časové průběhy několika testů, při nichž jsem se zaměřil na zjištění rozsahu průtoků, které bude možné měřit, jsou ukázány na obrázku 5.3 na straně 31. Za spodní hranici tohoto rozsahu lze považovat 80 či 100 ml/min. Limitující je dosažený teplotní rozdíl, který u průtoku 80 ml/min (na obrázku průběh první) činní po ustálení pouze přibližně 0,45 °C, což je málo v porovnání s výchyly klidového stavu až  $\pm 0,3$  °C.

Shora pak nebude ověřovací měření limitováno samotným měřičem, ale spíše kalibračním zařízením. Zatímco v případě průtoku 150 ml/min (na obrázku třetí), který motorizovaná stříkačka dodává maximálně po dobu 24 sekund se měřený rozdíl teplot v závěru ustálit stihne, s průtokem 200 ml/min (průběh čtvrtý), kdy nabíhá rozdíl teplot na vyšší hodnotu a průtok je k dispozici o 6 sekund kratší dobu, je vidět, že ještě těsně před sestupnou hranou aplikovaného průtoku měřené hodnoty stále stoupaly.



**Obrázek 5.2.** Ofukování trubičky v měřicí jednotce ventilátorem

## 5.2 Kalibrace na vzduch – hledání závislosti $Q_V(\Delta T)$

V momentě kdy jsem měl po prvotním otestování představu o rozsahu, pustil jsem se do systematického měření na jehož základě bych do vyhodnocovací jednotky naprogramoval závislost  $Q_V(\Delta T)$  včetně kalibrační konstanty pro vzduch. Provedl jsem drobnou úpravu softwaru motorizované stříkačky, aby bylo v rozsahu 100–180 ml/min možné vytvořit devět různých průtoků odkrokovaných po 10 ml/min. Kalibrační měření jsem provedl pro pět z těchto hodnot, přičemž každá hodnota průtoku byla měřena třikrát. Výsledky měření jsou uvedené v tabulce 5.1.

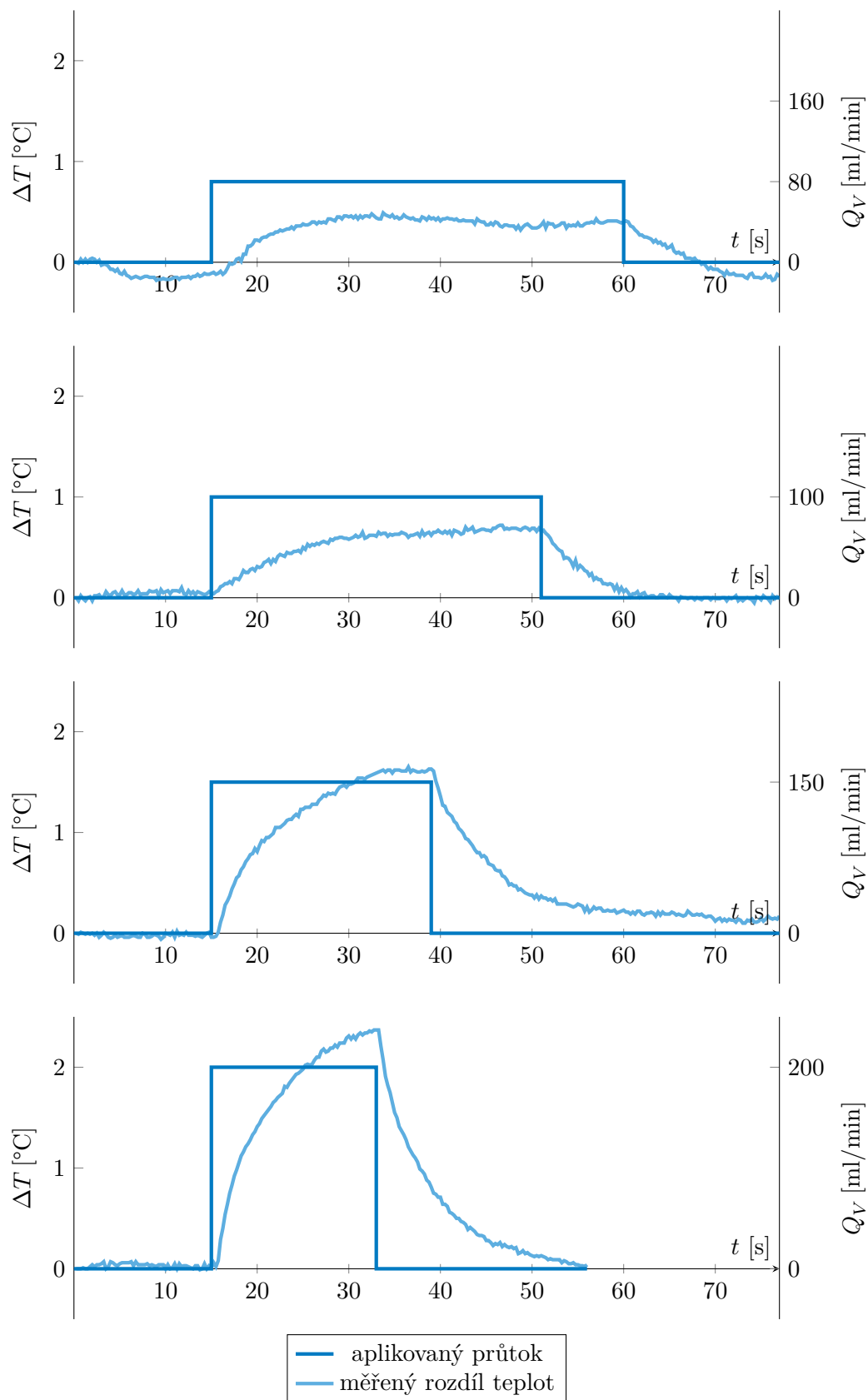
aplik. $Q_V$ [ml/min]	měřený $\Delta T$ [°C]			arit. průměr
	1.	2.	3.	
100	0,81	0,74	0,80	0,78
120	1,07	1,13	1,10	1,10
140	1,57	1,48	1,51	1,52
160	1,94	1,88	1,95	1,92
180	2,49	2,27	2,35	2,37

**Tabulka 5.1.** Naměřené hodnoty při kalibraci se vzduchem

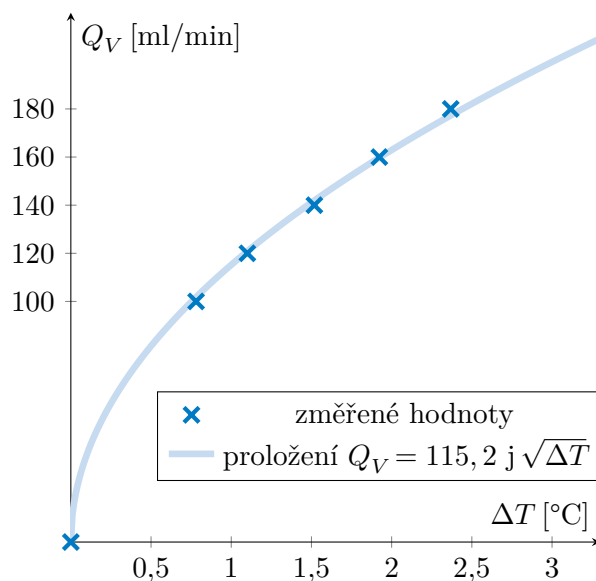
Měřený rozdíl teplot jsem ze zaznamenaných časových průběhů určil jako průměr hodnot před sestupnou hranou aplikovaného průtoku. Pro průtoky 100 a 120 ml/min u kterých se teplotní rozdíl zcela spolehlivě ustálil před tím, než stříkačka dojde vzduch, se jednalo o průměr 20 hodnot (s krokem 250 ms udávajících  $\Delta T$  pět sekund před sestupnou hranou). U zbylých průtoků pak bylo průměrováno pouze šest hodnot měřených méně než 1,5 sekundy před koncem obdelníku kalibračního průtoku.

I během tohoto měření udržovala konfigurace výkonových rezistorů zapnutých během dvousekundových period vždy na 1,4 s a 120mm ventilátoru s necelými 4000 otáčkami za minutu teplotu tělíska v okolí 62 °C. Teplota v laboratoři pak byla 25 °C.

Předmětem zájmu se pak samozřejmě stala závislost  $Q_V$  nad aritmetickým průměrem rozdílů teplot z prvního, druhého a třetího měření. Body jsem vynesl do grafu na

**Obrázek 5.3.** Časové průběhy prvotního testování s ventilátorem

obrázku 5.4. Na první pohled se zdá, že by pět vyznačených bodů mohlo být proloženo lineárně s velkou chybou nuly. To však není možné udělat, protože každému měření korekce nuly předcházela. Zařadil jsem proto do grafu ještě bod (0, 0).



**Obrázek 5.4.** Závislost  $Q_V(\Delta T)$  pro vzduch

Když se body odpovídající měřeným hodnotám prokládají křivkou, zdůvodňuje se obvykle tvar křivky relevantní teorií. V tomto případě však mně známá teorie není, rozhodl jsem se proto pro model, který by datům odpovídal nejlépe. To byl model s odmocninou a jediným parametrem  $a\sqrt{\Delta T}$ , který dosáhl  $R^2 = 0,9992$ . Například u modelu  $a\Delta T \cdot \exp(b\Delta T)$  bylo  $R^2$  o čtyři tisíce méně. Pro proložení byl využit nástroj Curve Fitting ze softwaru Matlab a hodnota parametru  $a$  byla stanovena na 115,2 s poněkud nevšední jednotkou  $\text{ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{°C}^{-\frac{1}{2}}$ , kterou budu dále v textu značit jen jako  $j$ .

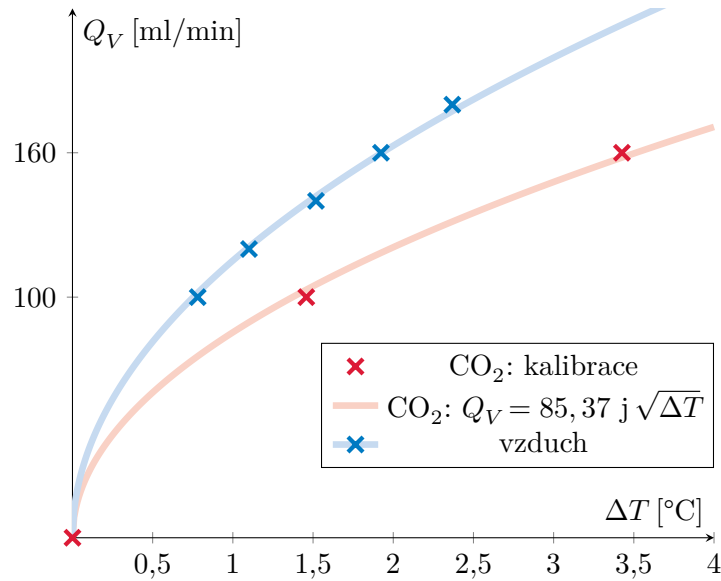
### 5.3 Kalibrace na $\text{CO}_2$

Jelikož je čistý oxid uhličitý z pochopitelných důvodů méně dostupný než vzduch a dále jelikož při jeho měření očekávám obdobnou závislost pouze s jiným parametrem, provedl jsem druhé kalibrační měření pouze pro průtoky 100 a 160 ml/min, pro každou hodnotu dvakrát. Naměřená data pak shrnuje tabulka 5.2. Pro určení jediné číselné hodnoty  $\Delta T$  z celého časového průběhu byla použita stejná metoda jako při kalibraci se vzduchem.

aplik. $Q_V$ [ml/min]	měřený $\Delta T$ [°C]		arit. průměr	směrodat. odch. [mK]
	1.	2.		
100	1,47	1,44	1,46	16
160	3,68	3,17	3,43	256

**Tabulka 5.2.** Naměřené hodnoty při kalibraci s oxidem uhličitým

Měřené hodnoty jsem stejným způsobem proložil stejným modelem. Prokladem s  $R^2 = 0,999$  byl určen parametr  $a = 85,37 j$ . Porovnat kalibrační data a modely pro vzduch a oxid uhličitý je možné na obrázku 5.5.



**Obrázek 5.5.** Porovnání závislostí  $Q_V(\Delta T)$  pro vzduch a oxid uhličitý

Ačkoliv jsem použil model s odmocninou, domnívám se, že parametry média by v závislosti měli hrát obdobnou roli jako v případě lineární závislosti

$$Q_m = A \frac{c_p \Delta T}{P},$$

kterou uvádějí [6–7, 15]. U objemového průtoku pak dostávám

$$Q_V = \frac{c_p}{\rho} \cdot \frac{A}{P} \cdot \Delta T,$$

kde  $c_p$  a  $\rho$  jsou parametry média a  $A$  společně s  $P$  jsou jiné parametry na médiu nezávislé. Toto rozdělení tedy zavedu i v modelu s odmocninou:

$$Q_V = \underbrace{\frac{c_p}{\rho}}_a \cdot b \sqrt{\Delta T},$$

kde  $b$  je parametr na médiu nezávislý. Podle stanovené hodnoty parametru  $a$  pro vzduch a hodnot z tabulky 3.1 pro teplotu 20 °C pak:

$$115,2 \text{ j} = \frac{c_{p,\text{vzd}}}{\rho_{\text{vzd}}} \cdot b = \frac{1006 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}}{1,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} \cdot b$$

$$b = 2,3 \times 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \sqrt{\text{°C}}.$$

Parametr  $a$  pro oxid uhličitý by pak vycházel

$$a = \frac{c_{p,\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} \cdot b = 63,6 \text{ j}.$$

To je hodnota od experimentálně určeného  $a = 85,37 \text{ j}$  poměrně vzdálená, minimálně je zde však soulad s tím, že  $Q_V(\Delta T)$  pro oxid uhličitý by mělo být pozvolnější než závislost pro vzduch.

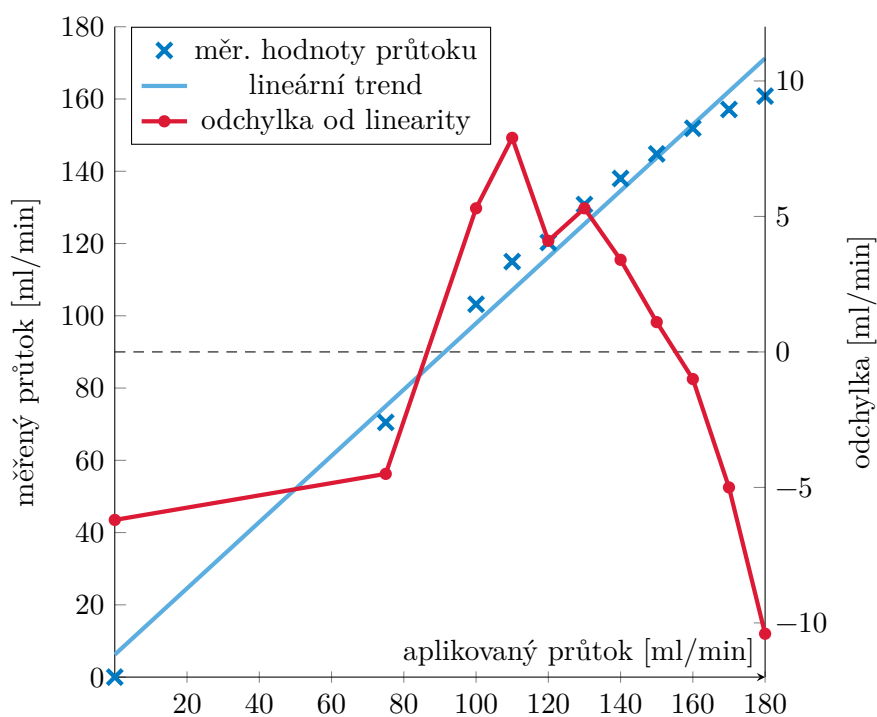
## 5.4 Ověřovací měření s CO<sub>2</sub>

Po provedené kalibraci jsem odmocninový model včetně parametrů pro oba měřené plyny naprogramoval do procesoru ve vyhodnocovací jednotce, přičemž podle vztahu se začíná počítat až při rozdílu teplot větším než 0,5 °C. Menší teplotní rozdíly jsou považovány za šum a je zobrazován a zapisován průtok 0 ml/min.

Následně jsem provedl ověřovací měření s oxidem uhličitým, jehož výstupem tedy byl již přímo měřený objemový průtok. Každou hodnotu z rozsahu 100–180 ml/min s krokováním po 10 ml/min jsem měřil jednou, vzhledem k tomu, že měřič je na CO<sub>2</sub> citlivější než na vzduch, zařadil jsem i měření průtoku 75 ml/min. Naměřené hodnoty jsou zapsané v tabulce 5.3.

aplik. průtok [ml/min]	měř. průtok [ml/min]	lineární trend [ml/min]	ochylka od linearity [ml/min]
0	0,0	6,2	-6,2
75	70,5	75,0	-4,5
100	103,2	97,9	5,3
110	115,0	107,1	7,9
120	120,3	116,2	4,1
130	130,8	125,4	5,3
140	138,0	134,6	3,4
150	144,8	143,8	1,1
160	151,9	152,9	-1,0
170	157,1	162,1	-5,0
180	160,8	171,3	-10,4

**Tabulka 5.3.** Hodnoty z ověřovacího měření s oxidem uhličitým



**Obrázek 5.6.** Měřicí charakteristika zhotoveného zařízení

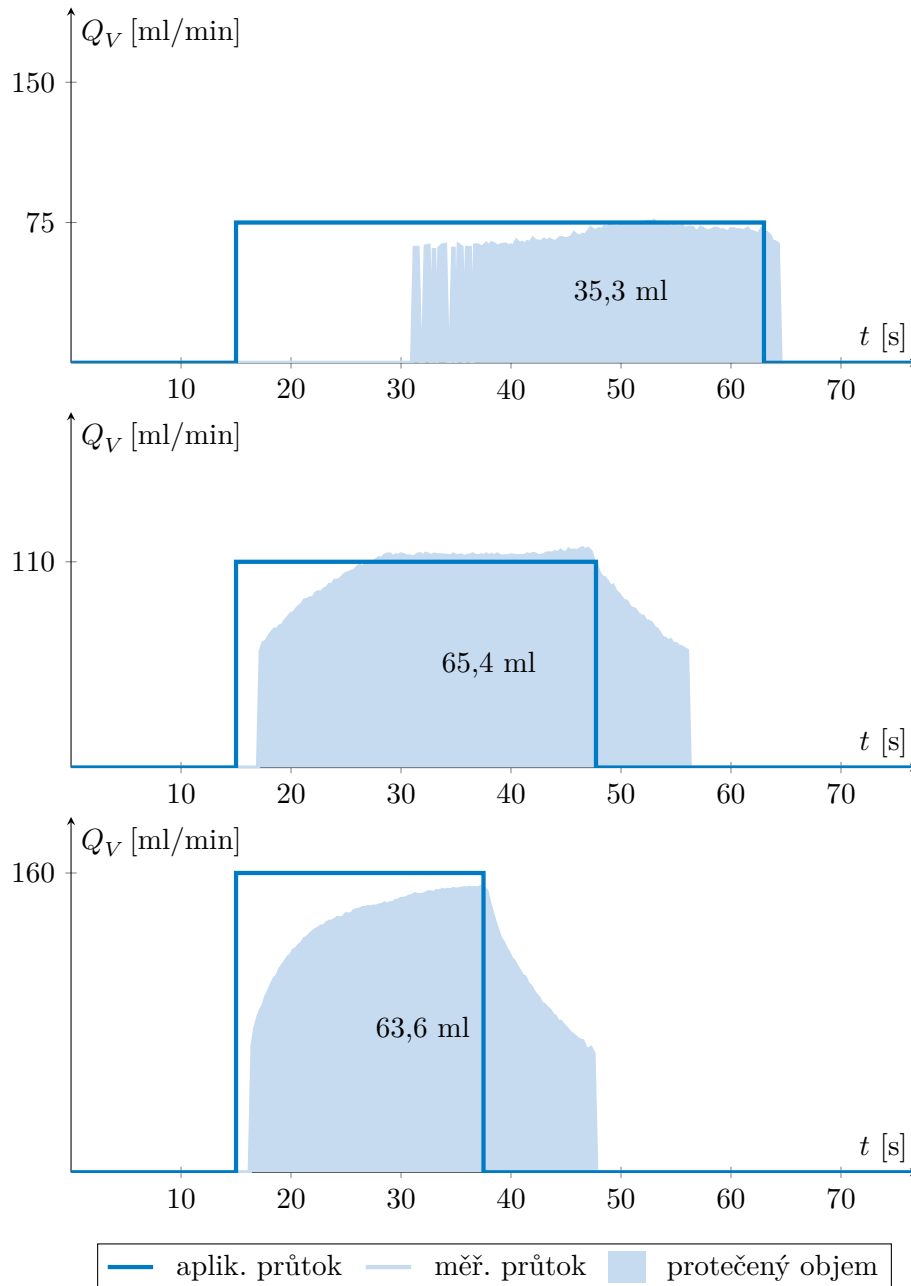
Laboratorní podmínky i podmínky měření a vyhodnocení byly stejné jako v případě kalibračních měření. Pro úplnost dodávám, že aplikovaný průtok 130 ml/min byl společně s průtokem 120 ml/min a nižšími vyhodnocován průměrem z 20 hodnot.

V MS Excel jsem pak určil lineární trend

$$Q_{V,\text{linT}} = 0,917 Q_{V,\text{apl}} + 6,2 \text{ ml/min},$$

kde  $Q_{V,\text{apl}}$  je průtok aplikovaný kalibračním zařízením. Dále jsem dopočítal odchylky od trendu a vše zpracoval do měřicí charakteristiky, která je na obrázku 5.6.

Na ukázkou dynamických vlastností měřiče jsem vybral měření průtoků 75, 110 a 160 ml/min, jejichž časové průběhy jsou na obr. 5.7. U těchto měření jsem v Matlabu funkcí `trapz` pro jednoduchou numerickou integraci vypočítal změřené protečené objemy ke srovnání s objemem motorizované stříkačky 60 ml.



**Obrázek 5.7.** Časové průběhy vybraných ověřovacích měření

## 5.5 Diskuze výsledků

Přesnost měření, které přístroj po zkalibrování dosahuje považuji za dobrou. Největší odchylky měřeného a skutečného průtoku se při ověřovacím měření vyskytly u průtoků 160, 170 a 180 ml/min. To přisuzuji hlavně krátkému času, po který motorizovaná stříkačka tyto vyšší průtoky dodává. Je sice pravda, že časy byly stejně krátké i při kalibračním měření, avšak náběh na rozdíl teplot není po každé přesně stejně rychlý. To potvrzuje i poslední sloupec kalibrační tabulky 5.2 – zatímco při průtoku 100 ml/min činila směrodatná odchylka dvou kalibračních měření pouhých 16 mK s průtokem 160 ml/min to bylo 256 mK. Při vyšších průtocích, kdy se teplotní rozdíl nestihne spolehlivě ustálit také začíná velmi záležet na tom, aby byla stříkačka spuštěna přesně ve správný čas, což se ne vždy dokonale povedlo.

Za spodní hranici měřicího rozsahu při měření průtoku oxidu uhličitého považuji oněch 75 ml/min. To je uspokojivý výsledek, je zde však prostor pro zlepšování. Domnívám se, že s užitými termistory by šum při nulovém průtoku mohl být pouze  $\pm 150$  mK. Teplotní rozdíl 200 mK by pak dle odhadnutého modelu odpovídal průtoku asi 38 ml/min.

Co se horní hranice rozsahu týče, bohužel jsem se k ní s použitím motorizované stříkačky nedostal. Dle testování se vzduchem, při kterém jsem zkoušel i průtoky 300 a 400 ml/min, byť teplotní rozdíl těsně před sestupnou hranou průtoku ze stříkačky stále strmě rostl, si však troufám odhadnout, že po adekvátní kalibraci by zařízení bylo schopné měřit průtoky minimálně do 0,5 l/min, možná však i výrazně více. Záleželo by samozřejmě na tom, jak by se ve vyšších hodnotách začala chovat  $Q_V(\Delta T)$ . Limitem by pak mohlo být:

- kdyby začala prudce růst – snížila by se přesnost,
- kdyby rostla příliš pomalu (nebo vůbec) – pro měření velkých průtoků u kterých by bylo dosahováno velkých tepelných rozdílů by muselo být tělísko vyhříváno na moc vysoké teploty, nebo
- kdyby přestala být funkcí – tj. inverzní  $\Delta T(Q_V)$  by nebyla prostá – při daném rozdílu teplot by nebylo možné rozhodnout o který z více možných hodnot průtoku se jedná (maximálně na základě znalosti předchozích hodnot),
- popřípadě by mohlo jednoduše nejdříve dojít na konstrukční limity zařízení.

Je škoda, že nebylo možné moje vysvětlení konfliktu literatury uvedené v podsekcí 2.4.5, které předpovídá právě možnost s neprostou  $\Delta T(Q_V)$  experimentálně potvrdit ani vyvrátit.

Kapitolu uzavírám několika větami o dynamických vlastnostech, které celkově považuji za velmi dobré. Například při měření průtoku 100 ml/min, kdy měřená hodnota byla 103,2 ml/min byla poprvé hranice sto mililitrů za minutu přesažena po méně než 18 sekundách. Návrat na nulu je pak asi třikrát rychlejší, tomu však výrazně dopomůže pásmo  $\pm 0,5$  °C, ve kterém je rozdíl teplot považován za šum a ihned je měřena nula. Přihlédnout se také musí hlavně k tomu, že zásluhu nejen za rychlou reakci na klesající průtok nese ventilátor, který primárně nebyl součástí konstrukce zařízení.



# Kapitola 6

## Závěr

Teoretická část se detailněji věnovala principu kalorimetrické metody pro měření průtoku. Narazil jsem na rozpor v literatuře, kdy některé publikace uvádějí závislost hmotnostního průtoku  $Q_m$  na rozdílů měřených teplot  $\Delta T$  jako přímou úměru, jiné jako úměru nepřímou. Tento rozpor jsem se pokusil vysvětlit. Uvedl jsem ještě několik dalších metod měření průtoku, které jsou použitelné pro plyn, avšak u nich jsem se vždy zaměřil pouze na základní princip.

V rámci práce jsem dokončil zařízení pro kalibraci průtokoměru – tzv. motorizovanou stříkačku, kterou jsem začal vyvíjet v bakalářském projektu, do stavu hotového výrobku. Dále jsem se věnoval návrhu a výrobě měřicího zařízení, které využívá právě kalorimetrickou metodu a sestává se z měřicí a vyhodnocovací jednotky. Obě jednotky jsem zprovoznil. Původně jsem si myslel, že měřicí jednotka bude také dokončena do stádia hotového výrobku, během ověřovacího měření jsem však zjistil nutnost zásahu do konstrukce, a tak skončily obě jednotky jako funkční laboratorní vzorek.

Aby bylo měřicí zařízení možné považovat za hotový výrobek, bylo by potřeba vyhotovit vyhodnocovací jednotku ve formě plošného spoje zapouzdrěného do krabičky, obdobně jako to bylo uděláno u motorizované stříkačky. Konstrukce krabičky pro měřicí jednotku by pak musela být upravena pro osazení ventilátorů. Další možných vylepšení je mnoho, a to jak v oblasti hardwaru, tak v oblasti softwaru. Zařízení by kupříkladu mohlo umožnit úpravu kalibračních konstant bez zásahu do kódu či by mohlo pomocí numerické integrace měřit protečený objem.

Cíl práce vyslovený v úvodu považuji za splněný, s vyrobeným měřicím zařízením jsem vcelku spokojený, z vizáže motorizované stříkačky jsem přímo nadšený. Co se týče výsledků ověřovacího měření, hlavním limitem se ukázal být malý objem motorizované stříkačky, nebylo tak možné měřit vyšší průtoky. Po prvotním testování a zjištění přibližného měřicího rozsahu byla provedena kalibrace se vzduchem na pěti hodnotách průtoku v rozmezí 100–180 ml/min. Následně byla odhadnuta závislost  $Q_V(\Delta T)$  a zařízení bylo překalibrováno na oxid uhličitý. Na závěr bylo provedeno ověřovací měření s oxidem uhličitým na deseti hodnotách objemového průtoku v rozsahu 75–180 ml/min. Průměrná odchylka měřeného průtoku od průtoku aplikovaného stříkačkou činila 6,1 ml/min, což považuji za dobrý výsledek.

## Literatura

- [1] ALTENDORF, Matthias et al. *Flow Handbook: A Practical Guide: Measurement Technologies – Applications – Solutions*. 3rd. Reinach: Endress+Hauser, 2006. ISBN 3-9520220-4-7.
- [2] BEDNAŘÍK, Michal. *Fyzika 1 pro Kybernetiku a robotiku* [elektronická skripta]. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze.
- [3] BROŽ, Jaromír, Vladimír ROSKOVEC a Miloslav VALOUCH. *Fyzikální a matematické tabulky*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., 1980.
- [4] BURYAN, Petr. Velmi přesné ultrazvukové průtokoměry pro malé průtoky. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2006, **12**(10), s. 10. ISSN 1210-9592.
- [5] CASCETTA, Furio a Giuseppe ROTONDO. Effects of intermittent flows on turbine gas meters accuracy. *Measurement : Journal of the International Measurement Confederation*. 2015, vol. 69, s. 280-286. ISSN 0263-2241.
- [6] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.
- [7] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [8] Engineering ToolBox, (2014). *Gases - Dynamic Viscosities*. [online]. [cit. 16. května 2022]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/gases-absolute-dynamic-viscosity-d\\_1888.html](https://www.engineeringtoolbox.com/gases-absolute-dynamic-viscosity-d_1888.html)
- [9] Engineering ToolBox, (2018). *Carbon dioxide - Density and Specific Weight vs. Temperature and Pressure*. [online]. [cit. 16. května 2022]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-dioxide-density-specific-weight-temperature-pressure-d\\_2018.html](https://www.engineeringtoolbox.com/carbon-dioxide-density-specific-weight-temperature-pressure-d_2018.html)
- [10] FROST, Jim. How To Interpret R-squared in Regression Analysis. *Statistics By Jim: Making statistics intuitive* [online]. [cit. 19. května 2022]. Dostupné z: <https://statisticsbyjim.com/regression/interpret-r-squared-regression/>
- [11] GRODA, Bořivoj. *Mechanika tekutin a suspenzí*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2002. ISBN 80-7157-576-3.
- [12] HALL, Nancy. Bernoulli's Equation. *NASA – Glenn Research Center* [online]. posl. aktualizace 13. května 2021 [cit. 3. května 2022]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bern.html>
- [13] HUSÁK, Miroslav. *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Praha: Academia, 2008. Gerstner. ISBN 978-80-200-1478-8.
- [14] KADLEC, Karel. Plováčkové průtokoměry – průtokoměry s proměnlivým průřezem. *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2016, **22**(10), s. 12–15. ISSN 1210-9592.
- [15] KADLEC, Karel. Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (část 1–3). *Automa: časopis pro automatizační techniku*. 2006, **12**(10–12). ISSN 1210-9592.

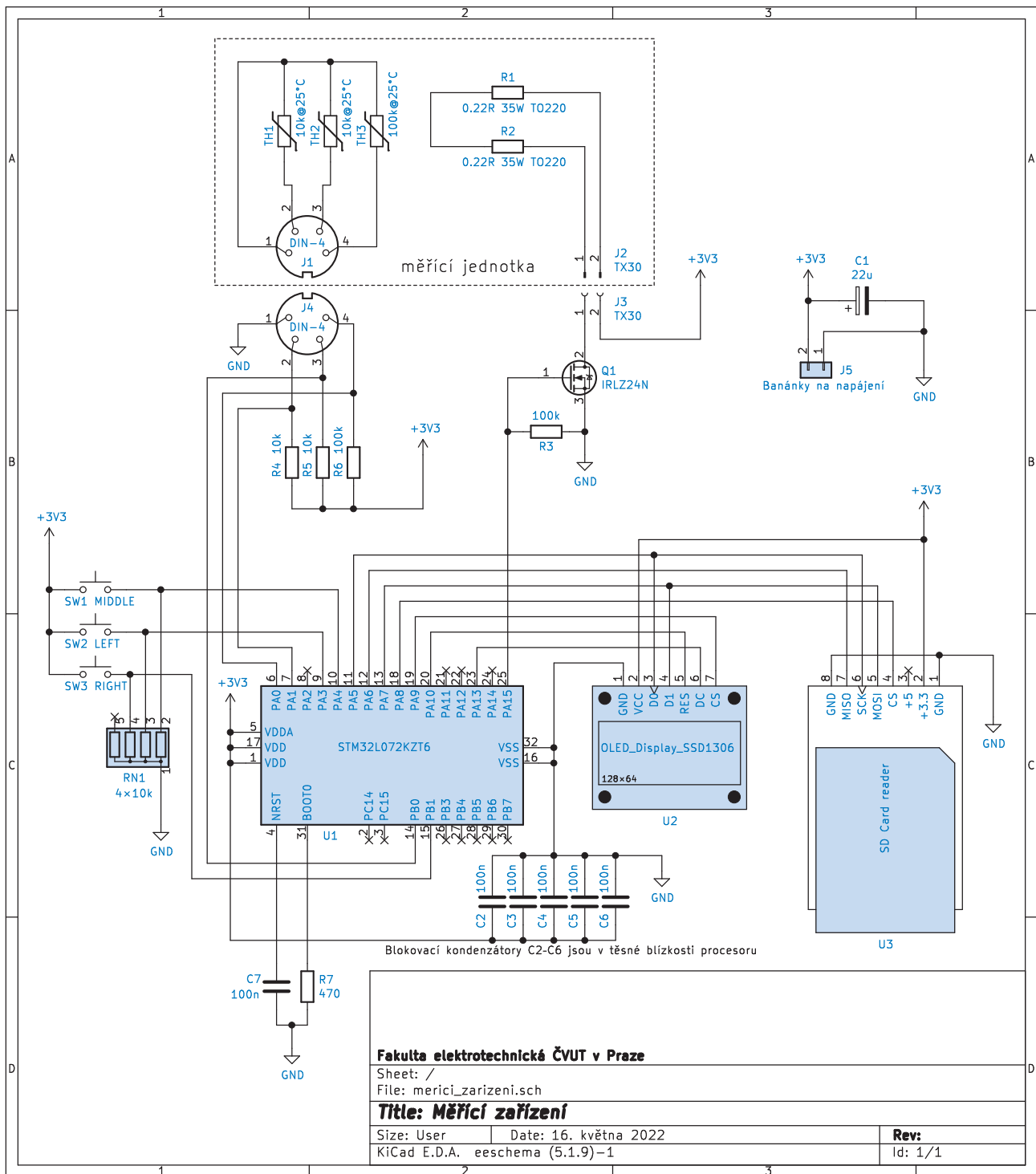
- [16] KIM, Jong-Dae, Doo-Hee JEONG, Hye-Jeong SONG, Yu-Seop KIM a Chan-Young PARK. Efficient Calibration Tool for Thermistor. *Sensors and Materials* [online]. 2015, **27**(8), s. 593–598 [cit. 20. května 2022]. ISSN 0914-4935. Dostupné z: [https://sensors.myu-group.co.jp/sm\\_pdf/SM1094.pdf](https://sensors.myu-group.co.jp/sm_pdf/SM1094.pdf)
- [17] KORF, Filip. *Zařízení pro měření průtoku plynu*. Praha, 2022. Zpráva k bakalářskému projektu. Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze. Vedoucí projektu byl Ing. Jan Novák, Ph.D.
- [18] Laminární a turbulentní proudění. *Základní kurz fyziky pro distanční studium na MFF UK* [online]. Matematicko-fyzikální fakulta UK [cit. 4. května 2022]. Dostupné z: [https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/kontinuum/4\\_5](https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/4_5)
- [19] Oxid uhličitý. *Integrovaný registr znečišťování životního prostředí* [online]. Ministerstvo životního prostředí [cit. 13. května 2022]. Dostupné z: [https://www.irz.cz/sites/irz.env.cz/files/repository/latky/oxid\\_uhlicity.pdf](https://www.irz.cz/sites/irz.env.cz/files/repository/latky/oxid_uhlicity.pdf)
- [20] PETRUCHA, Vojtěch. *Poznámky pro 1. týden: Laboratoře průmyslové elektroniky a senzorů* [online]. Verze 2. Katedra měření, Fakulta elektrotechnická ČVUT v Praze.
- [21] Resistor Guide: Pull-up and Pull-down Resistors. *EE Power* [online]. [cit. 16. května 2022]. Dostupné z: <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/pull-up-resistor-pull-down-resistor/>
- [22] RIPKA, Pavel a Alois TIPEK, ed. *Master books on sensors: modular courses on modern sensors Leonardo da Vinci project CZ/PP-134026*. Praha: BEN – technical literature, 2003. ISBN 80-7300-129-2.
- [23] SLOVÁČEK, Antonín. *Měření průtoku plynu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 72s. Vedoucí diplomové práce byl doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [24] Terčíkové průtokoměry a spínače KOBOLD. *ElektroPrůmysl.cz* [online]. 18. prosince 2011 [cit. 3. května 2022]. ISSN 2571-0761. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/tercikove-prutokomery-a-spinace-kobold>
- [25] Устройство турбинных преобразователей расхода. In: *ЭлектроТехИнфо ETI.SU* [online]. 29. prosince 2011 [cit. 1. května 2022]. Dostupné z: [https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika\\_527.html](https://eti.su/articles/izmeritelnaya-tehnika/izmeritelnaya-tehnika_527.html)

## Technické dokumentace

- [26] *Datasheet - STM32L072x8 STM32L072xB STM32L072xZ* [online]. STMicroelectronics, 2. září 2015, posl. aktualizace 14. listopadu 2019 [cit. 16. května 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l072kz.pdf>
- [27] *Chip Temp. Sensing NTC Thermistor – SDNT Series* [online]. Shenzhen: Sunlord, posl. aktualizace 15. dubna 2018 [cit. 14. května 2022]. Dostupné z: [https://www.laskakit.cz/user/related\\_files/sunlord-sdnt1608x103f3950ftf.pdf](https://www.laskakit.cz/user/related_files/sunlord-sdnt1608x103f3950ftf.pdf)
- [28] *IRLZ24N: HEXFET® Power MOSFET* [online]. California: International Rectifier [cit. 14. května 2022]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-315.1.pdf>
- [29] *STM32F042x4 STM32F042x6* [online]. STMicroelectronics, 25. února 2014, posl. aktualizace 10. ledna 2017 [cit. 16. května 2022]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f042f6.pdf>

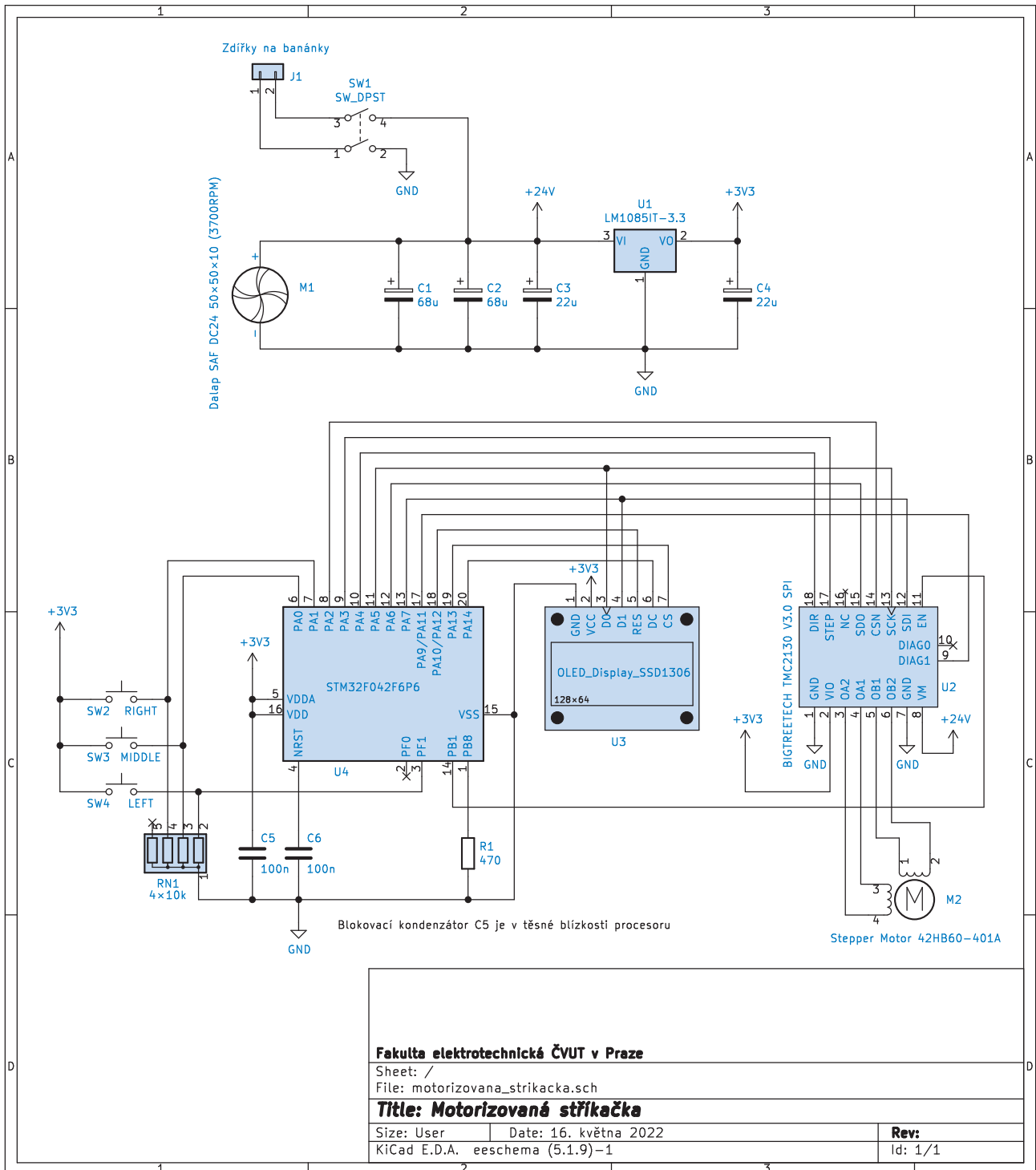
# Příloha A

## Celkové schéma měřicího zařízení



# Příloha B

## Celkové schéma motorizované stříkačky



# Příloha C

## Elektronické přílohy

Na přiloženém CD resp. v přiloženém ZIP balíčku, čtete-li elektronickou verzi práce, naleznete:

- merici\_zarizeni
  - 3D\_modely
    - krabicka.stl
    - vicko.stl
  - software
    - zdrojovy\_kod
      - ...
      - strojovy\_kod.bin
      - mbed\_projekt.zip
      - nahravaci\_obvod.pdf ... podle [20]
- motorizovana\_strikacka
  - 3D\_modely
    - drzak\_cela\_strikacky.stl
    - drzak\_kohoutku.stl
    - drzak\_spicky\_strikacky.stl
    - krabicka.stl
    - pist.stl
  - software
    - zdrojovy\_kod
      - ...
      - strojovy\_kod.bin
      - nahravaci\_obvod.pdf ... podle [20]