

Měření malých průtoků tekutin pomocí teplotních senzorů

Measurement small flows of fluids by using temperature sensors

Bc. Robert Tihlář

Diplomová práce
2007



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky
akademický rok: 2006/2007

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Robert TIHLÁŘ**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Automatické řízení a informatika**

Téma práce: **Měření malých průtoků tekutin pomocí teplotních senzorů**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou měření malých průtoků tekutin.
2. Navrhněte kalorimetrický průtokoměr s využitím senzorů teploty FlowSens FS2 firmy IST AG.
3. Proveďte metrologická měření u realizovaného typu průtokoměru.
4. Navrhněte a realizujte teplotně značkovací průtokoměr s využitím senzoru FS2 firmy IST AG.
5. Proveďte metrologická měření u realizovaného typu průtokoměru.
6. Porovnejte vlastnosti a měřicí rozsahy obou typů průtokoměrů.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Moravské přístroje: Katalog CONTROL WEB.
2. BAMBUCH, J.: Web vizualizace a řízení modelu teplotních soustav. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, 2003.
3. Holotik, L.: Měření malých průtoků tekutin pomocí teplotních senzorů. Diplomová práce, UTB ve Zlíně, 2006.
4. HRUŠKA, F.: Technické prostředky automatizace IV. UTB ve Zlíně, 2001.
5. CHUDÝ, V., PALEČNÁR, R.: Meranie technických veličin. STU Bratislava, Bratislava, 1999.
6. ĎADO, S., KREIDL, M. : Senzory a měřicí obvody. ČVUT, Praha, 1999.
7. WEBSTER, J.: The measurement, instrumentation, and sensors. Handbook, U.S.A., 1999.
8. Bastian, P.: Praktická elektrotechnika. Europa — Sobotáles, Brno, 2004.
9. www.ist-ag.com
10. www.advantech.com
11. www.mi.cz

Vedoucí diplomové práce: **Mgr. Milan Adámek, Ph.D.**
Ústav elektrotechniky a měření


Datum zadání diplomové práce: **13. února 2007**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2007**

Ve Zlíně dne 13. února 2007


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá měřením malých průtoků tekutin. Pro měření byl použit senzor FS2T od firmy IST-AG pracující na termoodporovém principu. K vizualizaci měřených dat a jejich vyhodnocování bylo použito prostředí programu CW.

Práce je složena z teoretické a praktické části. V první části jsou zpracovány z různých literárních zdrojů teoretické podklady sloužící k definování základních pojmů v oblasti průtoku tekutin, způsobů měření průtoku a typů průtokoměrů. Závěrečná část teoretického oddílu seznamuje čtenáře s programovým prostředím CW. Praktická část se zabývá tvorbou aplikace v prostředí CW a prací se senzorem. Dále v této části práce popisují vytvoření měřicího kanálu a sestavení průtokoměru z nezbytných komponent. Nedílnou součástí práce je samotné měření a grafické vyhodnocení malých průtoků plynů.

Klíčová slova: Senzor, průtok, teplota, průtokoměr, kanál, peristaltické čerpadlo, CW, aplikace, normální děje, rychlé děje, karta PCI 1716.

ABSTRACT

Presented diploma work is focused on measuring of the small gas flow. There was used sensor FS2T from the company IST-AG which works on the thermoresistance principle. There was used program CW for data evaluation and process visualization.

Diploma work consists of theoretic part and practical part. In first theoretic part there is summary of data and formulas concerning with section gas flow method of flow measurement and sorts of flow-meters. At the end of this theoretic part acquaint readers with program CW. Last part is devoted to program CW. The second practical part is based on generating of application in program CW and measuring with sensor. In the following there is described generating of measuring channel and compilation of flow-meter from necessary components. Integral part of my diploma work is measuring and graphic processing of small gas flow.

Keywords: Sensor, flow, temperature, flow-meter, channel, peristaltic pump, CW, application, normal action, fast action, card PCI 1716.

Poděkování, motto

Rád bych při této příležitosti poděkoval vedoucímu diplomové práce Mgr. Milanu Adámkovi Ph.D., za odborné vedení, připomínky a pomoc v průběhu řešení této diplomové práce.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků, je-li to uvolněno na základě licenční smlouvy, budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 24.5.2007

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 PRŮTOK	10
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE.....	10
1.2 DRUHY PROUDĚNÍ	11
1.3 ZÁKONY POPISUJÍCÍ PROUDĚNÍ TEKUTIN.....	12
1.3.1 Základní termodynamické zákony pro průtok plynů	12
1.4 METODY MĚŘENÍ PRŮTOKU	17
1.4.1 Kritéria výběru snímače	18
2 PRŮTOKOMĚRY	20
2.1 HMOTNOSTNÍ TEPELNÉ PRŮTOKOMĚRY	20
2.1.1 Přenos tepla v proudící tekutině.....	21
2.1.2 Tok tepla a Fourierův zákon	21
2.1.3 Typy hmotnostních teplotních průtokoměrů.....	22
2.2 SENZORY MIKROPRŮTOKU.....	27
3 CONTROL WEB 2000	30
3.1 CO JE CONTROL WEB 2000	30
3.2 CONTROL WEB A REÁLNÝ ČAS	30
3.3 POPIS FUNKCÍ CONTROL WEBU	31
Nastavení vlastností a chování přístrojů.....	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
4 TVORBA APLIKACE V PROSTŘEDÍ CONTROL WEBU	37
4.1 KARTA ADVANTECH PCI 1716.....	37
4.1.1 Popis karty Advantech PCI 1716	37
4.1.2 Instalace karty	39
4.2 INSTALACE CONTROL WEBU 2000	41
4.2.1 Ovladač ADV PCI pro normální děje	41
4.2.2 Ovladač ADVBUF pro rychlé děje	43
4.3 TVORBA APLIKACE	48
4.3.1 Virtuální přístroje	48
4.3.2 Propojení virtuálních přístrojů:	48
4.3.3 Práce s ovladači a kanály	49
4.3.4 Výsledná aplikace	50
5 PRŮTOKOVÝ SENZOR FS2/FS2T A NÁVRH KANÁLU	53
5.1 POPIS PRODUKTU.....	53
5.2 TECHNICKÉ ÚDAJE.....	53
5.2.1 Konstrukční rozměry.....	54
5.2.2 Elektronický obvod	54

5.3	NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE PRO KONEKTOR SENZORU	56
5.4	NÁVRH KANÁLU	56
5.5	PERISTALTICKÉ ČERPADLO	57
5.5.1	Princip činnosti peristaltického čerpadla	57
5.5.2	PCD 21M	58
5.6	SESTAVENÍ PRŮTOKOMĚRU	59
5.6.1	Komponenty pro sestavení průtokoměru	59
5.6.2	Postup při sestavení průtokoměru	59
6	MĚŘENÍ.....	63
6.1	CHARAKTERISTIKY SENZORU	65
6.1.1	Statická charakteristika senzoru.....	65
6.1.2	Dynamická charakteristika senzoru	65
6.2	CHARAKTERISTIKY PRŮTOKOMĚRU	66
6.2.1	Statické charakteristiky realizovaného průtokoměru plynu.....	66
6.2.2	Dynamické charakteristiky realizovaného průtokoměru plynu	71
6.3	URČENÍ NEZÁVISLOSTI MĚŘENÍ PROUDÍCÍHO PLYNU NA TEPLITĚ.....	73
6.3.1	Naměřené charakteristiky.....	73
6.4	PULZNÍ TOPENÍ	77
7	PRŮTOKOVÝ SENZOR NAVRŽENÝ PRO PULZNÍ TOPENÍ	78
7.1	POPIS PRŮTOKOMĚRU	78
7.2	NÁVRH KANÁLU	78
7.3	SESTAVENÍ PRŮTOKOMĚRU	80
7.3.1	Postup při sestavení průtokoměru	80
7.3.2	Princip činnosti průtokoměru a zpracování dat.....	81
7.4	MĚŘENÍ NA VYTVOŘENÉM PRŮTOKOMĚRU.....	82
7.4.1	Průběhy na realizovaném průtokoměru	83
	DISKUZE VÝSLEDKŮ	85
	ZÁVĚR.....	86
	FINISH.....	88
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	89
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	90
	SEZNAM OBRÁZKŮ	91
	SEZNAM TABULEK.....	93
	SEZNAM GRAFŮ	94
	SEZNAM PŘÍLOH.....	95

ÚVOD

Měření průtoku a rychlosti tekutin patří v řadě průmyslových odvětví k nejdůležitějším. Od začátku osmdesátých let proto došlo k výraznému zdokonalení dlouhodobě známých principů měření. Měření průtoku se tak stalo jedním z nejvíce propracovaných typů měření. Na trhu se díky tomu objevilo velké množství ekonomicky dostupných a zároveň velmi přesných měřidel pracujících na různých principech.

Tato diplomová práce se zabývá měřením malých průtoků tekutin. Je složena ze dvou částí: teoretické a praktické. Jelikož oblast měření průtoků tekutin je velmi rozsáhlá, zaměřuje se teoretická část práce především na definování základních pojmů a vlastností, vztahujících se k měření průtoků. Dále popisuje principy nejčastěji používaných metod měření. Teoretická část také seznamuje s prostředím CW a uvádí jeho základní vlastnosti a nastavení.

V praktické části je popsána tvorba aplikace v prostředí CW, postup sestavení kanálu pro měření průtoků a konečná konstrukce průtokoměru. Práce je zaměřena na měření průtoku tekutiny pomocí metody spojitého a pulzního topení. Pro účely měření uvedených v práci je použit senzor FS2T od firmy IST-AG pracující na termoodporovém principu. Proto je část praktické části věnována popisu a vlastnostem tohoto senzoru. V praktické části se také uvádí schémata zapojení senzorů teploty a výpočty, které odstraňují závislost průtoku tekutiny na teplotě okolního vzduchu. Nedílnou součástí práce jsou konkrétní měření a grafické vyhodnocení naměřených dat.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRŮTOK

1.1 Základní pojmy a definice

Tekutina je látka bez specifického tvaru vyznačující se tendencí při pohybu (toku) sledovat obrysy nádoby. Jako tekutina se chovají kapaliny, plyny a páry. Kapaliny se od plynů a par liší tím, že vytváří povrchovou vrstvu (volnou hladinu), dále pak charakterem závislosti hustoty ρ na tlaku p (praktická nestlačitelnost kapalin). U *nestlačitelné tekutiny* lze zanedbat závislost hustoty na tlaku, tedy lze předpokládat, že hustota je konstantní. Pokud nelze zanedbat závislost hustoty na tlaku, pak jde o *tekutinu stlačitelnou*.

Proudění je chápáno jako makroskopický pohyb tekutiny. Lze rozdělit na:

- *jednorozměrné proudění* – všechny částice se pohybují jedním směrem a rychlost v libovolném místě tekutiny je určena pouze velikostí,
- *rovinné proudění* – částice se pohybují ve vzájemně rovnoběžných rovinných drahách. Vektor rychlosti je určen složkami v rovině proudění. Ve směru kolmém k rovině proudění je složka rychlosti nulová,
- *prostorové proudění* – vyznačuje se obecnou polohou vektoru rychlosti a k jeho určení je nutné znát všechny tři jeho složky.

Průtok je podíl množství tekutiny protékající průtočným průřezem potrubí a času potřebného k protečení tohoto množství daným průřezem. Průtok je možné vyjadřovat v objemových nebo hmotnostních jednotkách. Rozlišujeme tedy dva základní druhy průtoku:

- *Objemový průtok* je definován jako podíl objemu látky, která projde daným průřezem a času, kde ΔV je elementární objem protékající tekutiny a Δt je časový interval. Jednotkou objemového průtoku je m^3/s .

$$Q_v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

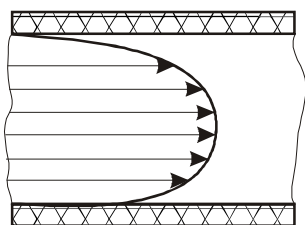
- *Hmotnostní průtok* je definován jako podíl hmotnosti látky, která projde daným průřezem a času, kde Δm je elementární hmotnost protékající tekutiny a ρ je hustota proudící tekutiny. Jednotkou hmotnostního průtoku je kg/s . [1]

$$Q_m = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

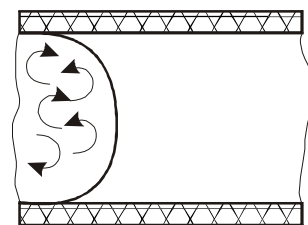
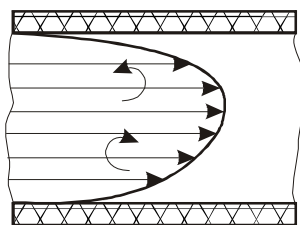
1.2 Druhy proudění

Povaha proudění je závislá na rozložení třecích (viskózních) a setrvačných sil v tekutině. Při pohybu tekutiny v potrubí mohou její částice v ustáleném stavu proudit dvěma způsoby. Částice se mohou pohybovat po rovnoběžných drahách *souběžně* se stěnou potrubí, nebo se jejich dráhy mohou *křížit*. Existuje ještě třetí takzvaný *přechodný stav*, který je kombinací obou předchozích stavů. Stav, ve kterém se částice pohybují po rovnoběžných drahách, které tvoří vrstvy, se nazývá *laminární tok*. Při tomto druhu proudění se vrstvy nemísí. Rychlost proudění je rozdělena parabolicky s největší rychlostí v ose potrubí a nejmenší rychlostí v místě styku hraničních vrstev s vnitřními stěnami potrubí, kde jsou účinky třecích sil největší. Vzniká tak tzv. *úplně vyvinutý rychlostní profil* ve tvaru rotačního osově symetrického paraboloidu. Laminární proudění je typické pro viskózní tekutiny a malé rychlosti proudění,

Stav, při kterém vzniká velké množství vírů, které přemísťují částice tekutiny všemi směry, tedy i napříč toku, se nazývá *turbulentní tok*. Uplatňují se především účinky setrvačných sil, tekutina proudí ve většině průtočného průřezu téměř stejnou rychlostí a rychlostní profil je plochý.



laminární proudění



turbulentní proudění

Obr. 1. Rychlostní profil pro různé druhy proudící tekutiny

Zda je tok při určitých podmínkách *laminární* nebo *turbulentní*, závisí na poměru velikosti setrvačných a viskózních sil. Při malých rychlostech proudění jsou setrvačné síly v proudící tekutině obvykle malé. Viskózní síly mohou být však značné. V tomto případě se zpravidla vytváří laminární struktura toku.

Poměr setrvačných a viskózních sil kvantitativně určuje strukturu toku tekutiny. Tento poměr je známý pod názvem *Reynoldsovo číslo* (kritérium) *Re*.

1.3 Zákony popisující proudění tekutin

1.3.1 Základní termodynamické zákony pro průtok plynů

Látky v plynném skupenství se mohou chovat jako ideální nebo neideální plyny. Základem jevů v ideálních plynech jsou zákony *Gayův – Lussacův* a *Boyleův – Marriotův*, které uvádí závislosti mezi stavovými veličinami p, V, T . **Stavovou rovnici** pro ideální plyny lze psát ve tvaru

$$\frac{pV}{T} = nR \quad (3)$$

Pravá strana stavové rovnice je pro daný plyn neměnná. Proto pro plyn procházející potrubím nebo průtokoměrem lze v různých místech na základě stavové rovnice napsat

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_x V_x}{T_x} \quad (4)$$

kde stavové veličiny s dolním indexem o jsou uvažovány při vztažných podmínkách a veličiny s dolním indexem x pak v libovolném místě.

Pro neideální plyny je nutné stavovou rovnici upravit zavedením koeficientu kompresibility z na tvar

$$pV = znRT \quad (5)$$

kde R je univerzální plynová konstanta $R = 8,13441 \text{ JK}^{-1}$ a koeficient z (stlačitelnost) je poměr objemu skutečného a ideálního plynu o stejné hmotnosti a tlaku. Koeficient z je závislý na teplotě, tlaku a složení plynu.

Rovnice kontinuity

Pro nestlačitelné tekutiny musí být zachována hmotnost tekutiny proudící v uzavřeném potrubí mezi dvěma místy pozorování o ploše průřezu S_1 a S_2 rychlostmi v_1 a v_2 za stejný časový interval. Jinak by došlo k akumulaci nebo rozpouštění tekutiny v potrubí. Tedy musí platit

$$\rho S_1 v_1 = \rho S_2 v_2 \quad (6)$$

a tedy

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \textit{konst.} \quad (7)$$

Tedy pro proudění nestlačitelných tekutin a libovolný průřez potrubí platí vztah

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 = \dots = S_i v_i = \textit{konst.} \quad (8)$$

označovaný jako **rovnice kontinuity**.

Bernoulliho rovnice

Bernoulliho rovnice popisuje energetické poměry při proudění tekutin a představuje aplikaci zákona zachování energie. Základním předpokladem její platnosti je nestlačitelnost tekutiny a rovnoměrné rozdělení rychlosti po průřezu potrubí.

Sestavení bilance mechanické energie lze zjednodušit tím, že lze uvažovat jen tekutinu nestlačitelnou. Při ustáleném proudění ideální kapaliny potom platí, že součet kinetické a potenciální energie a tlaku p je konstantní. [11]

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + p + \rho g z = \textit{konst.} \quad (9)$$

resp. po vydělení rovnice hustotou ρ přejde předešlá rovnice na tvar

$$\frac{1}{2}v^2 + \frac{p}{\rho} + gz = konst. \quad (10)$$

Rovnice (9) a (10) reprezentují dvě formy zápisu známé **Bernoulliho rovnice** vyjadřující energetickou bilanci ustáleného toku ideální tekutiny. Každý člen této rovnice má fyzikální význam objemové energie. Symbol p odpovídá tlaku prostředí (termodynamickému tlaku) a číselně je shodný s tlakovou objemovou energií. Součin $(\rho \cdot g \cdot z)$ odpovídá *hydrostatický tlak* p_{stat} tekutiny a číselně je shodný s polohovou objemovou energií. Analogicky součin $(\frac{1}{2}\rho v^2)$ vyjadřuje *dynamický tlak* p_{dyn} . Pak celkový tlak (hustota energie) je určen vztahem

$$p_t = p_{stat} + p_{dyn} \quad (11)$$

Poiseuilleův zákon

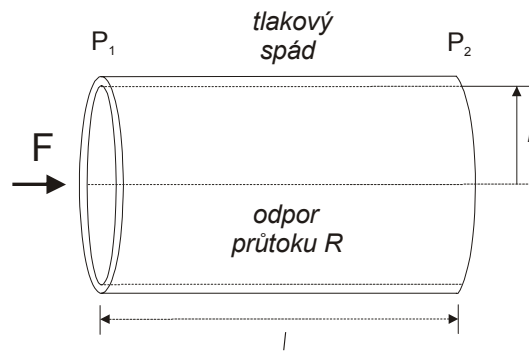
Objemový průtok Q_V lze pro $Re < 2000$ určit na základě Hagenova – Poiseuilova zákona ve tvaru

$$Q_V = \frac{\pi D^4}{128 \mu l} \Delta p \quad (12)$$

kde je

Q_V	objemový průtok,
D	vnitřní průměr potrubí,
μ	viskozita tekutiny,
l	délka trubice mezi otvory,
Δp	rozdíl tlaků.

Tento zákon platí pro Newtonovské tekutiny s minimální turbulencí. Objemový průtok lze také určit z Hagenova – Poiseuilova zákona jako podíl tlakového rozdílu a viskózního odporu



Obr. 2. Princip Poiseuillova zákona

$$Q_V = \frac{p_1 - p_2}{R_V} \quad (13)$$

Viskózní odpor R_V je odpor kruhového potrubí o poloměru r a je roven hodnotě

$$R_V = \frac{8\mu l}{\pi r^4} \quad (14)$$

U *newtonovských tekutin* je viskozita závislá na teplotě, tlaku a na chemickém složení tekutiny. Platí, že u nestlačitelných tekutin je viskozita tekutiny stálá v celém jejím objemu. Jako newtonovské tekutiny se chovají zejména plyny a kapaliny s nízkou molekulární vahou.

Nenewtonovské tekutiny se vyznačují závislostí viskozity na smykovém napětí, proto je jejich viskozita poměrně obtížně definovatelná.

Podobnostní čísla

Reynoldsovo číslo

Důležitým kritériem pro posouzení druhu proudění je **Reynoldsovo číslo** Re , které udává poměr mezi setrvačnými a třecími silami v tekutině. Pro kruhové potrubí o světlosti d je Reynoldsovo číslo Re definováno vztahem

$$Re = \frac{\text{setrvačet_sily}}{\text{třec_sily}} = \frac{dv\rho}{\eta} = \frac{dv}{\nu} = \frac{dv}{\eta\nu_m} \nu \quad (15)$$

kde je:

- d je charakteristický délkový rozměr obtékaného povrchu (při proudění tekutiny v trubce jde o vnitřní průměr trubky, při obtékání koule pak jde o její průměr),
- v rychlost tekutiny,
- ρ hustota tekutiny ($kg \cdot m^{-3}$),
- η dynamická viskozita tekutiny ($Pa \cdot s$),
- ν kinematická viskozita tekutiny ($m \cdot s^{-1}$),
- v_m měrný objem tekutiny ($m^3 \cdot kg^{-1}$).

Limitní stavy *Reynoldsova čísla* v kruhovém potrubí jsou pro hodnoty:

- $Re < 2300$ jedná se o *laminární proudění*
- $2300 < Re < 10000$ jedná se o *přechodné proudění*
- $Re > 10000$ jedná se o *turbulentní proudění*

Kritické hodnoty *Reynoldsova čísla* pro jednotlivé typy proudění uváděné v literaturách nejsou zcela jednotné. Jiná literatura uvádí, že je-li $Re < 2000$, jedná se o laminární proudění. Pro $Re > 4000$ jde o turbulentní proudění. Přechodové proudění je definováno pro $2000 < Re < 4000$. Hraniční hodnoty *Re čísla* závisí na tvaru obtékaného povrchu. Přechod z laminárního do turbulentního proudění se podle posledních studií neděje postupně, jak se předpokládalo, ale turbulentní proudění vznikne za jistých podmínek náhlým skokem.

Nusseltovo číslo

Toto číslo je užíváno v souvislosti s přenosem tepla, např. u tepelných anemometrů. Nusseltovo číslo je definováno vztahem

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \quad (16)$$

- kde je α koeficient přestupu tepla,
- d charakteristická délka (průměr žhaveného drátku),

λ měrná tepelná vodivost tekutiny.

Machovo číslo

Určuje poměr rychlostí proudění v k rychlosti zvuku a a je dáno vztahem

$$Ma = \frac{v}{a} \quad (17)$$

Grashofovo číslo

Charakterizuje volnou neizotermickou konvekci tekutiny vyvolanou rozdílem hustoty, způsobenou teplotním spádem v tekutině

$$Gr = \frac{l^3 \rho^2 g \beta \Delta T}{\eta^2} \quad (18)$$

kde je l charakteristický geometrický rozměr systému,
 β koeficient tepelné objemové roztažnosti tekutiny.

Prandtlovo číslo

Toto číslo vyjadřuje poměr viskozity k tepelné difuzivitě, charakterizuje fyzikální vlastnosti tekutiny při konvektivním a difúzním přenosu tepla

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \rho c_p}{\rho \lambda} = \frac{\eta c_p}{\lambda} = \frac{Pe}{Re} \quad (19)$$

kde je a tepelná difuzivita (tepelná vodivost $\lambda = \frac{\lambda}{\rho c_p}$),

Pe Pecletovo číslo.

1.4 Metody měření průtoku

Měření průtoků množství tekutin patří do oblasti velmi důležitých. Pro měření průtoků tekutin lze využít jak přímých, tak nepřímých metod. **Přímé měření** objemového nebo

hmotnostního průtoku je možné dávkovacími senzory, rozdělovacími tekutinu na přesně definované díly a transportujícími je ve směru proudění. Dalším typem přímých průtokoměrů jsou průtokoměry založené na vážení jisté části protékající tekutiny.

Většina měření je **nepřímých** a vychází ze závislosti výstupní veličiny průtokoměru na kinetické energii nebo rychlosti proudící tekutiny. Průtokoměry využívající *rychlostní metody* (*rychlostní průtokoměry*) se používají převážně pro provozní měření a dělí se na:

- průtokoměry s konstantním průtočným průřezem (škrtící orgány, ultrazvukové, indukční, turbínové, tepelné apod.),
- průtokoměry s konstantní střední rychlostí proudění (plováčkové – rotametry a jejich modifikace).

Mechanických účinků *kinetické energie* proudící tekutiny využívají průtokoměry deformační, objemové a gyroskopické.

Pro některé aplikace může být užitečné třídění průtokoměrů podle charakteru výměny energie mezi senzorem a proudící tekutinou. Senzory, jejichž funkce je podmíněna odčerpáváním energie z tekutiny, se označují jako *senzory energii spotřebovávající* (EE). U těchto senzorů se energie pohybující tekutiny předává pevnému nebo pohyblivému elementu ponořenému do proudící tekutiny. Senzory, které při svoji činnosti přidávají energii do tekutiny, jsou označovány jako *senzory energii přidávající* (EA).

1.4.1 Kritéria výběru snímače

Při návrhu konstrukce a realizaci snímače se nutně setkáváme s řadou protichůdných požadavků a problémů, které jsou přímo spojeny s vlastnostmi měřené tekutiny, s měřicím rozsahem, s přesností snímače a také s měřením a vyhodnocováním výsledků měření.

Největší vliv na volbu snímače mají základní vlastnosti tekutin, které s tímto snímačem chceme měřit – skupenství, tlak, teplota, viskozita, hustota apod., ale také vlastnosti jako je barva, elektrická vodivost, znečištění, výbušnost a chemické vlastnosti.

Při výběru snímače je nutno uvážit celou řadu kritérií:

- Druh měření - jednorázové, trvalé, laboratorní, provozní
- Pracovní činnost - spojitá, nespojitá

- Druh, vlastnosti a parametry měřené tekutiny – kapalina, pára, plyn, teplota, tlak, viskozita, hustota, agresivita apod.
- Měřicí místo – potrubí, otevřený kanál, parametry, přístupnost, náběhové délky
- Rušivé vlivy snímače – trvalá tlaková ztráta, časové zpoždění
- Způsob indikace – průtok, protečené množství, parametry tekutiny, předvolba, signalizace
- Přesnost měření – bez nebo s korekcemi.

2 PRŮTOKOMĚRY

Obecně se používané průtokoměry dělí podle metody měření na:

- Objemové průtokoměry (s turbínkou, s lopatkovým kolem, s oválnými koly)
- Průřezová měřidla (clona, dýza, Venturiho trubice, rychlostní sonda)
- Plováčkové průtokoměry
- Termoelektrické průtokoměry
- Indukční průtokoměry
- Ultrazvukové průtokoměry
- Vírové průtokoměry
- Coriolisovy hmotnostní průtokoměry [5]

Vzhledem k tomu, že se diplomová práce zabývá měřením velmi malých průtoků tekutin, jsou v další části detailně popsány principy hmotnostních tepelných průtokoměrů.

2.1 Hmotnostní tepelné průtokoměry

Tepelné průtokoměry jsou založeny na výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie (vyhřívaným odporovým tělískem) a okolím (proudící plyn) v závislosti na hmotnostním průtoku. K jejich hlavním výhodám patří, kromě přímého měření průtoku, rychlost a přesnost měření a stabilita parametrů.

K praktické realizaci se používají dva základní způsoby:

- měření ochlazení vyhřívaného tělíska, tj. vinutí, drátku nebo fólie – jde o **hmotnostní termoanemometry**,
- měření oteplení plynu vyhřívaným prvkem – jde o **hmotnostní kalorimetry**.

2.1.1 Přenos tepla v proudící tekutině

Existuje-li v prostoru rozdíl teplot, může docházet k přenosu energie z oblastí o vyšší energetické hodnotě do oblastí s nižší energetickou hodnotou.

Přenos (sdílení) tepla v reálných systémech může probíhat různými způsoby, z nichž lze za základní považovat tyto:

- *Vedení tepla (kondukce)* - je způsobeno pohybem mikročastic (molekul, atomů), jejichž kmitáním se přenáší energie z míst s vyšší teplotou na místa s nižší teplotou. Tento typ přenosu tepla se vyskytuje zejména u pevných těles, ale i u tekutin za předpokladu, že je můžeme uvažovat makroskopicky v klidu.
- *Sdílení tepla prouděním (konvekce)* - je možné pouze v tekutém (tj. v kapalném nebo plynném) prostředí a přenos tepla se děje přemísťováním makročastic - promícháváním tekutiny a je nerozlučně spjat s přenosem samotného prostředí.
- *Sdílení tepla zářením (radiací, sálání)* - jde o přenos tepla elektromagnetickým vlněním. Teplo sálajícího tělesa se nejdříve změní v záření (elektromagnetické vlny), které se po dopadu na těleso, které je pohltí, opět změní na teplo.

2.1.2 Tok tepla a Fourierův zákon

Důvod, který způsobí přestup tepla, je rozdíl teplot ve spojitém systému, kde v určitém místě je teplota vyšší, než teplota v jiném místě tohoto systému. Pro přestup tepla mezi těmito dvěma místy je směrodatná především velikost rozdílu teplot, ale také vzdálenost těchto dvou míst, mezi kterými dochází k výměně tepla.

Existují-li ve spojitém prostředí rozdíly teplot, můžeme potom obdržet v případě trojrozměrného útvaru *izotermické plochy* a v případě dvourozměrného útvaru *izotermické čáry*. Splňuje-li prostředí podmínky kontinua je změna teploty spojitá.

Potom platí rovnice:

$$\mathit{grad} T = \nabla T = \mathbf{i} \frac{\partial T}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial T}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial T}{\partial z} \quad (20)$$

Rychlost přestupu tepla, *tok tepla* \dot{Q} , je množství tepla transportované za jednotku času:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (21)$$

Podíl toku tepla $d\dot{Q}$ a příslušné plochy dS se nazývá *hustota toku tepla*. Pro její absolutní hodnotu platí:

$$q = \frac{d\dot{Q}}{dS} \quad (22)$$

Výsledkem vztahu mezi teplotním gradientem a hustotou tepelného toku je známá Fourierova rovnice v tomto tvaru:

$$\mathbf{q} = -\lambda \mathit{grad} T \quad (23)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti prostředí.

Platnost výše uvedených vztahů je omezena na lineární vedení tepla a méně intenzivní tepelné výměny v izotropním prostředí.

2.1.3 Typy hmotnostních teplotních průtokoměrů

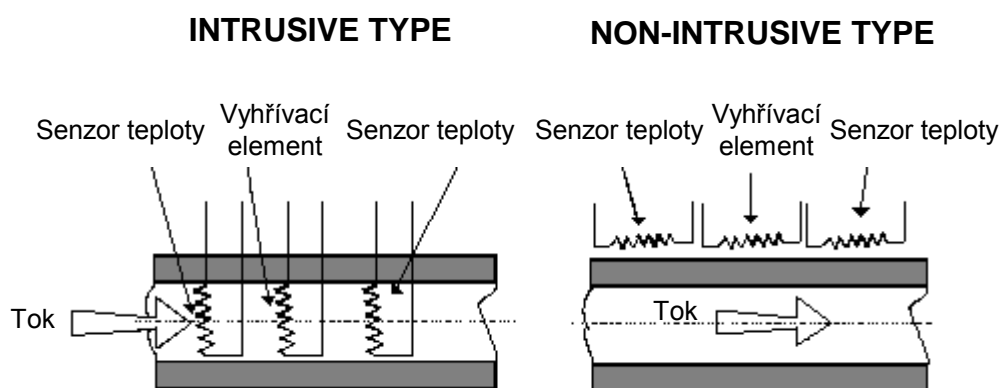
Kalorimetrické průtokoměry – spojité topení

Hmotnostní kalorimetrické průtokoměry jsou založeny na tepelné rovnováze mezi přiváděnou tepelnou energií z vyhřívaného elementu (přívodem tepla) a tepelnými ztrátami prouděním tekutiny, vedením v tělese (konstrukci, materiálu) průtokoměru a přestupem do vnějšího prostředí (odvod tepla).

Využívají měření rozdílu teplot proudícího media průtokoměrem ve dvou místech, přičemž proudící tekutina se v průtokoměru ohřívá známým tepelným výkonem.

Podle umístění vyhřívacího prvku a senzorů teploty existují dva typy kalorimetrických průtokoměrů (viz. obr.3):

- **snímač s vloženými senzory teploty (Intrusive Type)** - senzory teploty i vyhřívací element jsou v přímém kontaktu s proudícím médiem
- **snímač s vnějšími senzory teploty (Non-intrusive Type)** – teplota proudící tekutiny je snímána na vnějším povrchu trubice, ohřev tekutiny je prováděn také z vnější strany trubice. [1]

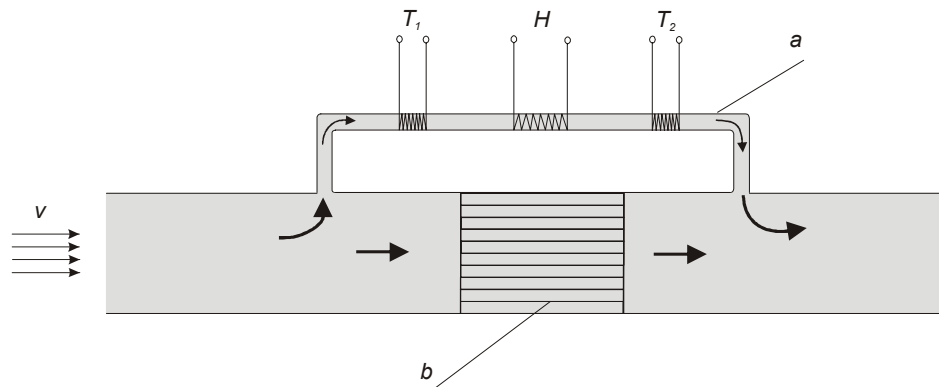


Obr. 3. Typy kalorimetrických průtokoměrů

Vyhřívaný element s hodnotou odporu R_H je napájen střídavým proudem, senzory teploty s hodnotami odporů R_1 , R_2 jsou zapojeny do odporového můstku. Při proudění plynu je odpor R_1 ochlazován proudícím plynem a odpor R_2 oteplován přenosem tepla z vyhřívaného odporu R_H a rovnováha můstku se poruší. Velikost výstupního napětí je úměrná hmotnostnímu průtoku Q_m .

Hlavní výhodou snímače s vnějšími senzory teploty je nepřímý kontakt senzorů teploty a vyhřívacího elementu s proudící tekutinou, což je výhodné zejména u agresivních tekutin. Nemůže také dojít k úniku proudícího média z důvodu netěsnosti.

Kalorimetrický průtokoměr v základním uspořádání je vhodný pro měření průtoku v rozsahu od 1 ml.min^{-1} do 500 ml.min^{-1} . Pro měření větších průtoků je vhodné použít odbočení tekutiny do tenkostěnné trubice s dobrou tepelnou vodivostí, na které jsou navinuty dva odporové senzory teploty a uprostřed topné vinutí.



Obr. 4. Princip kalorimetrického průtokoměru s odbočením

a) obtoková smyčka, b) laminární člen

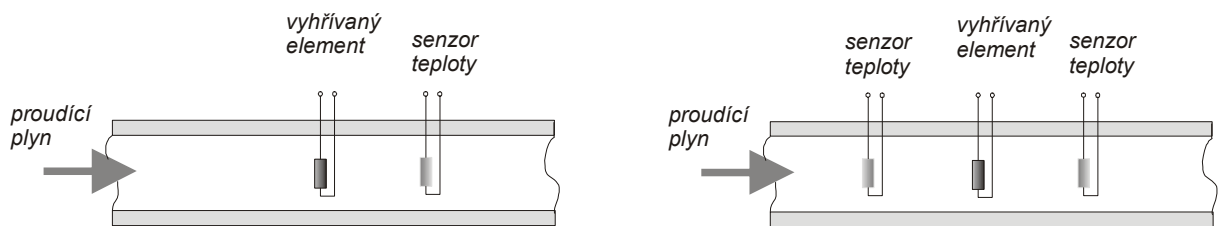
Základní princip měření kalorimetrického průtokoměru je patrný z obr.4. K porušení symetrie teplotního pole v okolí vyhřívacího elementu dochází v důsledku proudící tekutiny, nesymetrie teplotního pole narůstá se zvyšujícím se průtokem. Na obr. 5 je znázorněno rozložení teploty v okolí vyhřívacího elementu kalorimetru.



Obr. 5. Rozložení teploty v kalorimetrickém průtokoměru

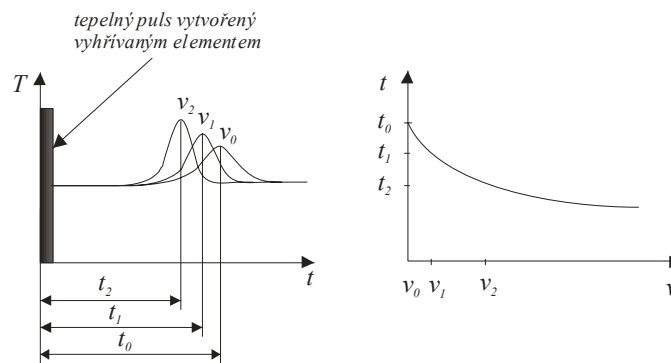
Teplotně-značkovací senzor průtoku – pulzní topení

Teplotně-značkovací senzor průtoku (Time-of-Flight Type) se skládá z vyhřívacího prvku a jednoho nebo více senzorů teploty, které jsou umístěny po směru proudění tekutiny. Tepelná značka je v krátkém časovém intervalu vytvořena pomocí pulzního proudu, který projde topným odporem. Značka je unášena proudícím plynem a je vyhodnocována po směru proudění pomocí senzorů teploty (pro vyhodnocování rychlosti proudícího plynu lze použít i senzor teploty umístěný proti směru proudění plynu). Princip teplotně značkovacího průtokoměru je uveden na obr. 6.



Obr. 6. Princip teplotně značkovacího průtokoměru (vlevo průtokoměr se senzorem teploty po směru proudění plynu, vpravo průtokoměr se dvěma senzory)

Teplo, které je vytvořeno pomocí vyhřívavého elementu, se šíří zejména v důsledku proudícího plynu. Je však nutno uvážit i přenos tepla v důsledku radiace, navíc dochází k částečnému prostupu tepla přes stěny proudící trubice. Této skutečnosti lze využít pro stanovení rychlosti proudění plynu a tedy pro určení hmotnostního průtoku. Na obr. 7. je u výše zmiňovaného typu průtokoměru zobrazen možný průběh teplot v místě senzoru teploty, který je umístěn po směru proudění plynu.



Obr. 7. Průběh teploty u teplotně značkovacího průtokoměru

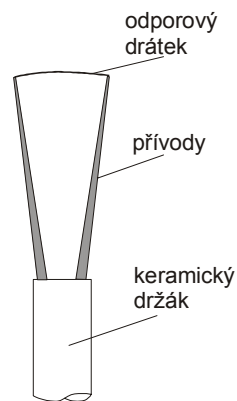
Tento typ je nevhodný pro dynamická měření vzhledem k velké časové konstantě průtokoměru. Naopak předností je nezávislost měření na vlastnostech tekutiny při vyšších průtocích. [4]

Tepelná anemometrie

Tepelná anemometrie je založena na přenosu tepla z vyhřívavého citlivého elementu do okolní proudící tekutiny. Princip spočívá ve skutečnosti, že ohřáté těleso vložené do proudící tekutiny se ochlazuje tím intenzivněji, čím je vyšší rychlost proudění tekutiny.

Tepelné ztráty snímače závisí na jeho geometrickém tvaru a rozměru, dále pak na rychlosti, teplotě, tlaku, objemové hmotnosti a tepelných vlastnostech proudící tekutiny.

Snímací část tepelného anemometru tvoří buď tenké vlákno nebo tenký film. Tenký drát, resp. film se může žhavit konstantním proudem, takže ho proudící tekutina ochlazuje a tím se mění jeho odpor, který se měří. Jinou možností je udržování konstantní teploty a tedy i elektrického odporu snímacího prvku proměnlivým napájecím napětím.



Obr. 8. Základní uspořádání termoanemometru

Přenos tepla z vyhřívaného drátku, který je umístěn do proudící tekutiny, závisí na vlastnostech tekutiny a na parametrech toku. K určení teplotních ztrát Q prouděním se vychází z Newtonova vztahu:

$$Q = \alpha S (t_e - t) \quad (24)$$

kde je

α	součinitel přestupu tepla prouděním,
S	vnější plocha odporového elementu,
t_e, t	teplota odporového elementu a proudícího plynu

Ze vztahu pro podmínky sdílení tepla na rozhraní tuhého tělesa a proudícího prostředí lze odvodit Nusseltovo kritérium Nu

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda} d \quad (25)$$

kde je

λ	součinitel tepelné vodivosti prostředí,
-----------	---

d průměr odporového elementu.

Sdílení tepla při proudění vyjadřuje vztah mezi Nusseltovým, Prandtlovým a Reynoldsovým číslem. Mezi kritérii platí funkční závislost, která se stanovuje experimentálně.

U tepelných anemometrů, využívajících ochlazování vyhřívaného elementu proudem tekutiny, se používá jednoho nebo dvou senzorů teploty. Častější je použití se dvěma senzory teploty a to zejména s ohledem na vyšší dosahovanou přesnost měření. Obvykle jeden ze senzorů je udržován na teplotě vyšší než okolí a je ochlazován proudícím plynem, druhý senzor je ve funkci kompenzačního (referenčního) senzoru a měří pouze teplotu proudícího plynu. Zpravidla je zapojen do můstku a slouží k automatické korekci změn teploty měřeného plynu. Oba odporové senzory bývají zpravidla umístěny přímo v potrubí kolmo ke směru proudícího plynu (senzor teploty proudícího plynu nesmí být ovlivňován vyhřívaným elementem). Anemometrem prochází vzhledem ke zvoleným hodnotám odporů výrazně větší proud, který tím zajišťuje jeho ohřívání. Naopak u odporového senzoru teploty je velikost proudu volena tak, aby splňovala pouze správné měření teploty plynu.

Pokud průtokoměrem neproudí tekutina a při zanedbání radiace a vedení tepla v přívodech, se teplo odvádí z vyhřívaného senzoru pouze vedením v měřeném médiu a volným prouděním (konvekci). Při pohybu tekutiny dochází k ochlazování vyhřívaného senzoru zejména v důsledku nuceného proudění a to tím intenzivněji, čím je rychlost proudění větší. Množství odvedeného tepla závisí na rychlosti proudění, tepelné vodivosti a teplotě plynu, významnou roli hraje i rovnoměrnost proudění a homogenita měřeného plynu.

2.2 Senzory mikroprůtoků

V řadě případů je třeba měřit velmi malé průtoky tekutin (v řádech $\text{nl}\cdot\text{min}^{-1}$ až $\text{ml}\cdot\text{h}^{-1}$). Typickými příklady mohou být aplikace v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu, dále v lékařství a v polovodičových technologiích. Při výrobě senzorů

mikroprůtoku se uplatňují litografické technologie LIGA, CMOS, MEMS, tenkovrstvé hybridní a flip-chip technologie.

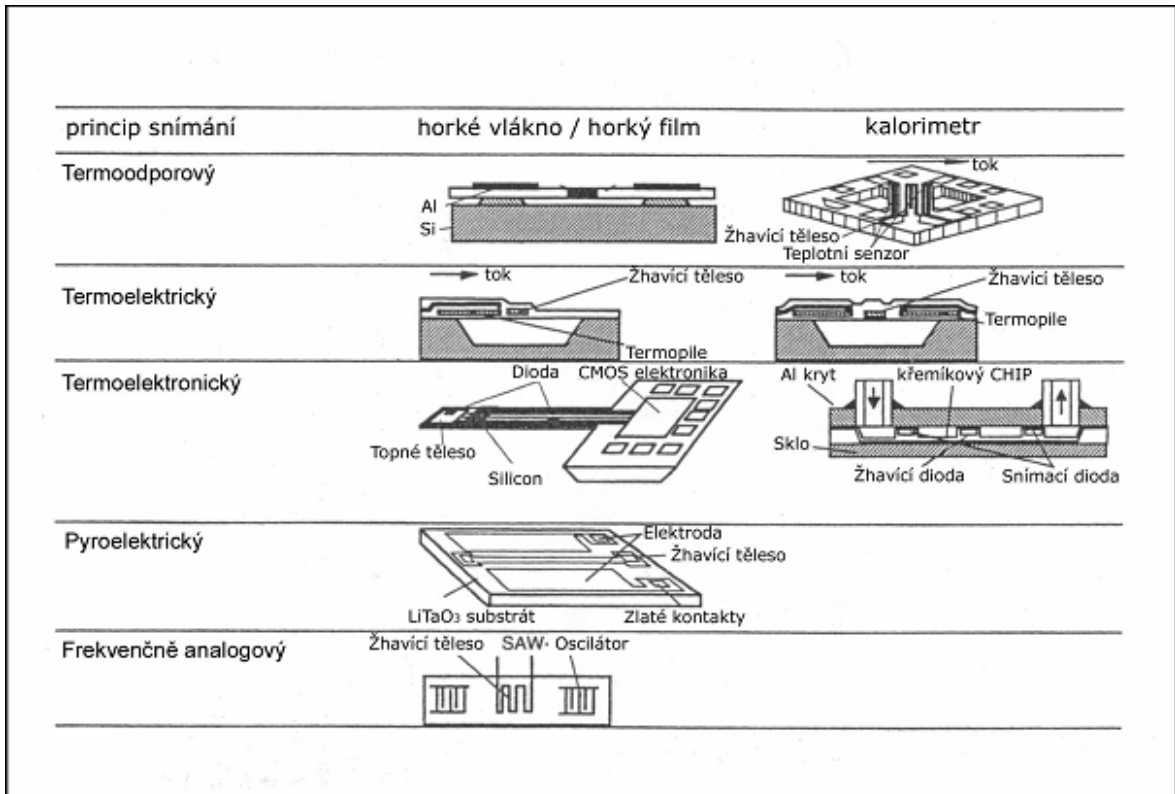
Zpravidla tyto senzory mikroprůtoku představují tzv. inteligentní senzory, které obsahují obvody pro zpracování, analýzu a unifikaci signálu v jediném kompaktním provedení s citlivou částí (čidlem) senzoru. Strukturu takového inteligentního senzoru lze rozdělit na tři části:

- *Vstupní část* – převod fyzikální veličiny na elektrickou, zesílení a filtrace signálu, linearizace statické charakteristiky, ochrana proti nežádoucímu působení parazitních veličin
- *Vnitřní část* – analogově – číslicový převod, číslicová linearizace, autodiagnostika,
- *Výstupní část* – unifikace analogových signálů, komunikace prostřednictvím integrovaného rozhraní se sběrníkovým systémem.

Modifikace vstupní citlivé části senzorů mikroprůtoku:

Tab. 1. Měřicí principy mikrosenzorů průtoku.

Měřicí princip	Realizace	Aplikace
Termoodporový	kovový film (platina), polykrystalický silikon, monokrystalický silikon, slitiny kovů	měření teploty, teplotního rozdílu, tepelného výkonu
Termoelektrický	pSi-Al (bipolární technologie), polySi-Al (CMOS-technologie), pPolySi- termopile	měření teploty, teplotního rozdílu
Termoelektronický	tranzistor, dioda	měření teploty, teplotního rozdílu
Pyroelektrický	pyroelektrické materiály (LiTaO3)	měření tepelného výkonu
Frekvenční	SAW oscilátor	měření teploty



Obr. 9. Základní typy uspořádání termoanemometru

3 CONTROL WEB 2000

3.1 Co je Control Web 2000

Program Control Web 2000 (dále jen Control Web nebo CW) od firmy Moravské přístroje a.s. (ČR) patří k velice rozšířeným produktům určeným pro vývoj průmyslových aplikací. Unikátní objektově orientovaná komponentová architektura zajišťuje aplikaci systému CW nejširší rozsah nasazení od prostých časově nenáročných vizualizací až po řídicí aplikace reálného času.

Control Web pracuje v prostředí operačních systémů implementujících aplikační programové rozhraní Win32 a podporuje řadu průmyslových standardů. Jako spousta jiných SCADA/HMI systémů používaných v průmyslu. K dispozici jsou všechny komponenty nutné k tvorbě vizualizačních aplikací, jako jsou zobrazovací a ovládací prvky, alarmy, archivy, historické trendy apod. Navíc ale poskytuje skutečnou otevřenou komponentovou architekturu (množina virtuálních přístrojů není pevně dána a zabudována v systému). Jednotlivé komponenty systému jsou volně programovatelné.

Pokud potřeby uživatelů sahají za možnosti řady panelů s vizualizačními a ovládacími prvky, každá komponenta má k dispozici libovolně definovatelné procedury reagující na události a lokální proměnné. Virtuální přístroje mohou být aktivovány po síti a i metody dynamického rozhraní mohou být volány po síti. Control Web umožňuje vizualizaci technologií prostřednictvím internetových standardů http a HTML pomocí libovolného WWW klienta, ať již pracuje v prostředí Windows, Linux nebo Apple Macintosh.

Pro svou výhodnou cenu je často používán i při výuce na středních a vysokých školách. Nasazení tohoto systému je tedy od celopodnikových vizualizačních systémů až po přímé řízení strojů a jednoduché vizualizace.

3.2 Control Web a reálný čas

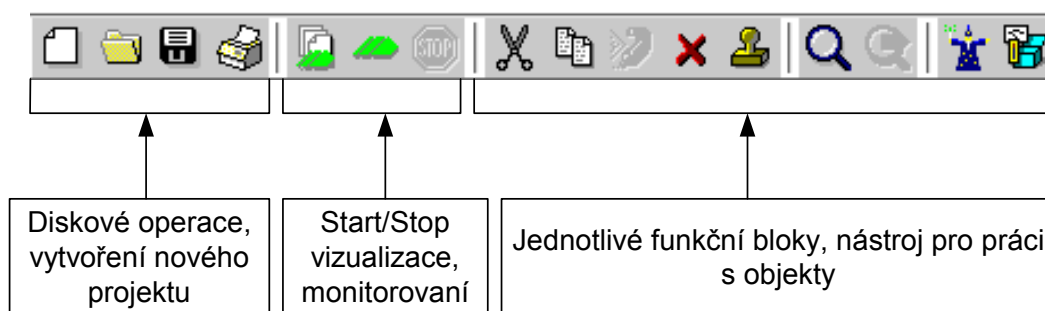
Většina vizualizačních programů nejen že nedokáže realizovat libovolné řídicí algoritmy, ale především nedokáže pracovat v přesném reálném čase. S volně programovatelným systémem Control Web lze v rámci jediného programového systému realizovat software PLC pro řízení strojů a výrobních linek, měřicích a regulačních

systemů i rozsáhlých síťových vizualizačních a operátorských systémů v reálném čase. Control Web se tedy nespolehá na tzv. databázi reálného času, která je doplňována „maximální možnou rychlostí“. Každý vstupně/výstupní kanál je čten přesně v době, kdy jej nějaký virtuální přístroj (nebo skupina přístrojů) požaduje. Real-time časování je přesně monitorováno a řízeno. [15]

Schopnost práce v reálném čase je v současné době nutným a zásadním požadavkem kladeným na moderní programové systémy pro průmyslovou automatizaci. Časové rozlišení aplikací systému Control Web lze zjemňovat až do řádu milisekund.[8]

3.3 Popis funkcí Control Webu







K rychlejšímu a pohodlnějšímu výběru funkce nám dobře poslouží *toolbar* aplikace Control Webu (obr. 10). Obsahuje následující bloky:






Obr. 10. Toolbar Control Webu

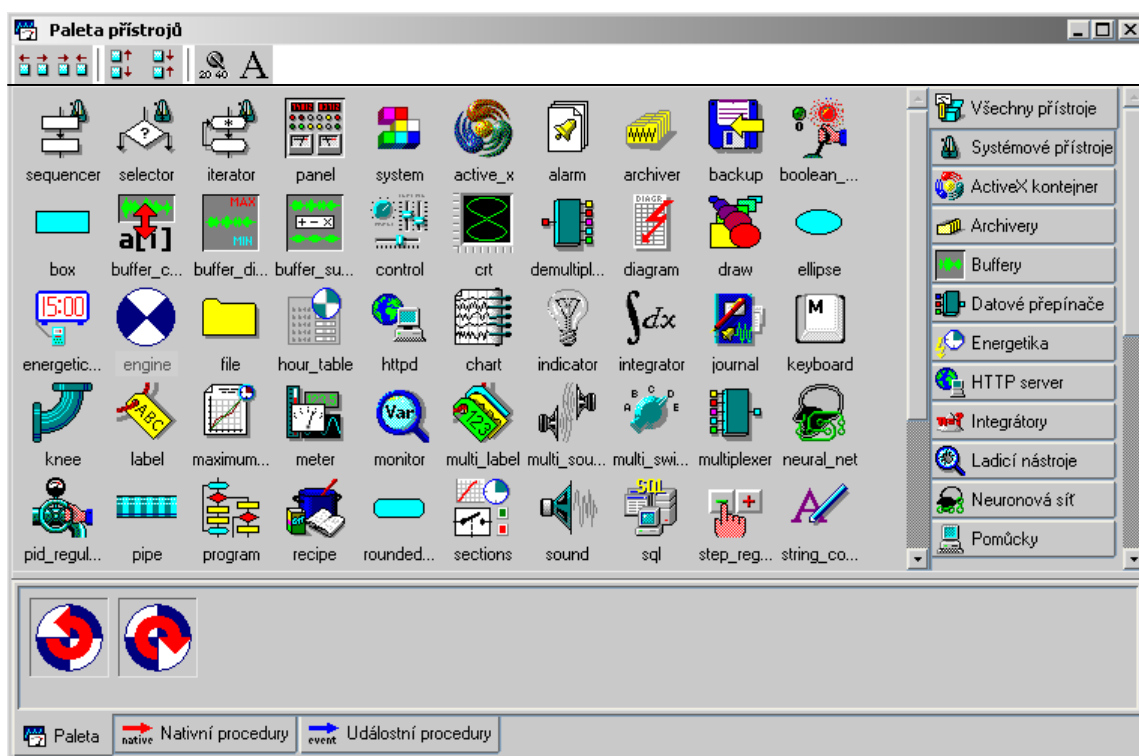
Funkce jednotlivých tlačítek *toolbaru* jsou popsány v následujících kapitolách.

Operace s projektem

-  Vytvoření nového prázdného projektu
-  Otevření již existujícího projektu uloženého na disku
-  Uložení aktuálního projektu na disk
-  Tisk aktuálního projektu
-  Vyříznutí přístroje
-  Vložení přístroje

-  Vyhledání přístroje
-  Paleta průvodců přidáním nového virtuálního přístroje
-  Paleta virtuálních přístrojů

Poslední dvě tlačítka umožňují vytvořit či přímo vložit objekt na pracovní plochu. Paleta přístrojů, ve které je možno zvolit virtuální přístroj je zobrazena na obr.11. Průvodce přidáním nového virtuálního přístroje (viz.obr.12) je spíše určen pro začátečníky a situace, kdy chceme co nejjednodušším způsobem vytvořit aplikaci bez nutnosti složitého studování uživatelských manuálů.



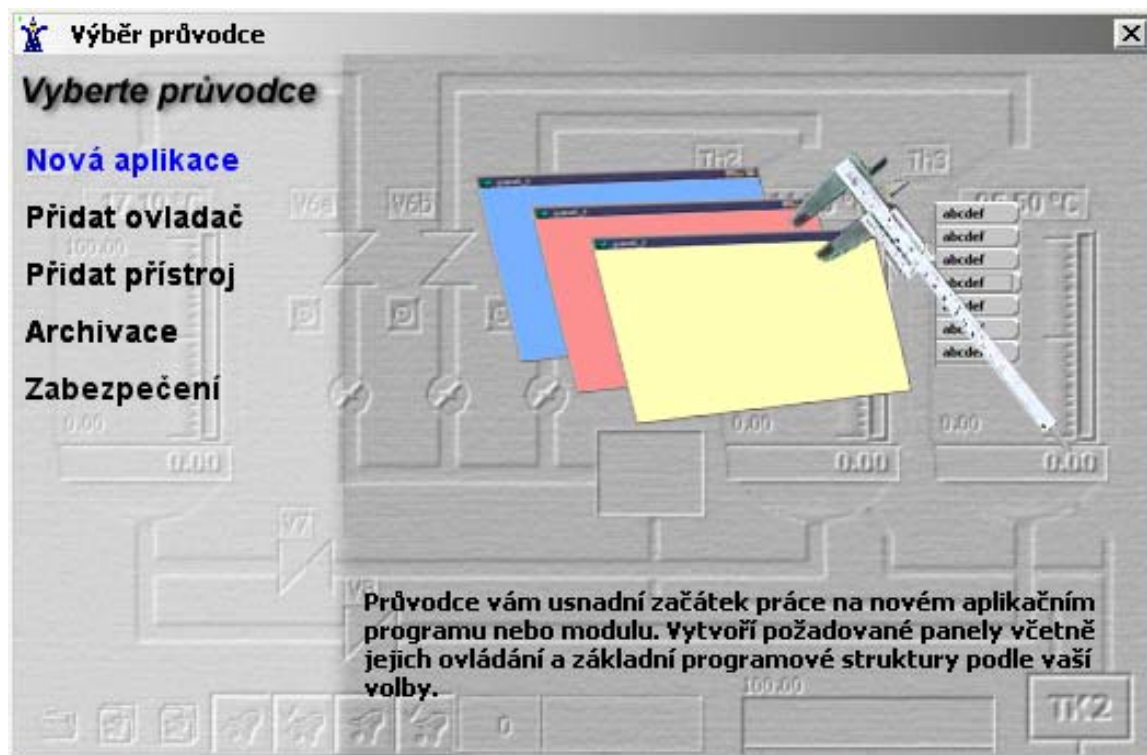
Obr. 11. Paleta virtuálních přístrojů

Co je to Aplikace

Aplikace systému Control Web je tvořena především množinou virtuálních přístrojů. Virtuální přístroj je programovatelná komponenta, sama osobě schopná pracovat a manipulovat s daty (jaká data a kolik jich je, závisí na typu přístroje). Každý virtuální přístroj je určité třídy (určitého typu). Tato třída jej předurčuje ke specifickému účelu.


Funkčnost virtuálních přístrojů ovšem není určena jen jejich třídou, ale množinou dalších parametrů (vlastností), které modifikují jejich činnost. Takovým parametrem může být například pozice přístroje na obrazovce, jeho barva, matematický výraz, který bude virtuální přístroj vyhodnocovat a jehož výsledek bude zobrazovat, a spousta dalších parametrů specifických pro daný přístroj. Další vlastností virtuálních přístrojů je, že musí být schopné si mezi sebou předávat data, jelikož prakticky nikdy nelze celou aplikaci realizovat jedním přístrojem. K uchovávání i předávání dat v systému slouží proměnné a kanály, společně nazývané *datové elementy*. Virtuální přístroje si tedy mohou předávat data tak, že jeden virtuální přístroj hodnotu datového elementu zapíše a druhý ji přečte. Práce s kanály se podobá práci s proměnnými s tím rozdílem, že zápis do kanálu způsobí přenos zapsané hodnoty přes ovladač do periferie a naopak při čtení z kanálu přenesení hodnotu z periferie přes ovladač do aplikace.

Aplikace je vždy uchovávána v podobě textového popisu. Všechny komponenty tvořící aplikaci spolu s dalšími informacemi jsou zapsány pomocí jmen, klíčových slov, výrazů apod. Zdrojový text je tedy volně čitelný a editovatelný.



Obr. 12. Paleta průvodce přidáním virtuálních přístrojů

Spuštění aplikace

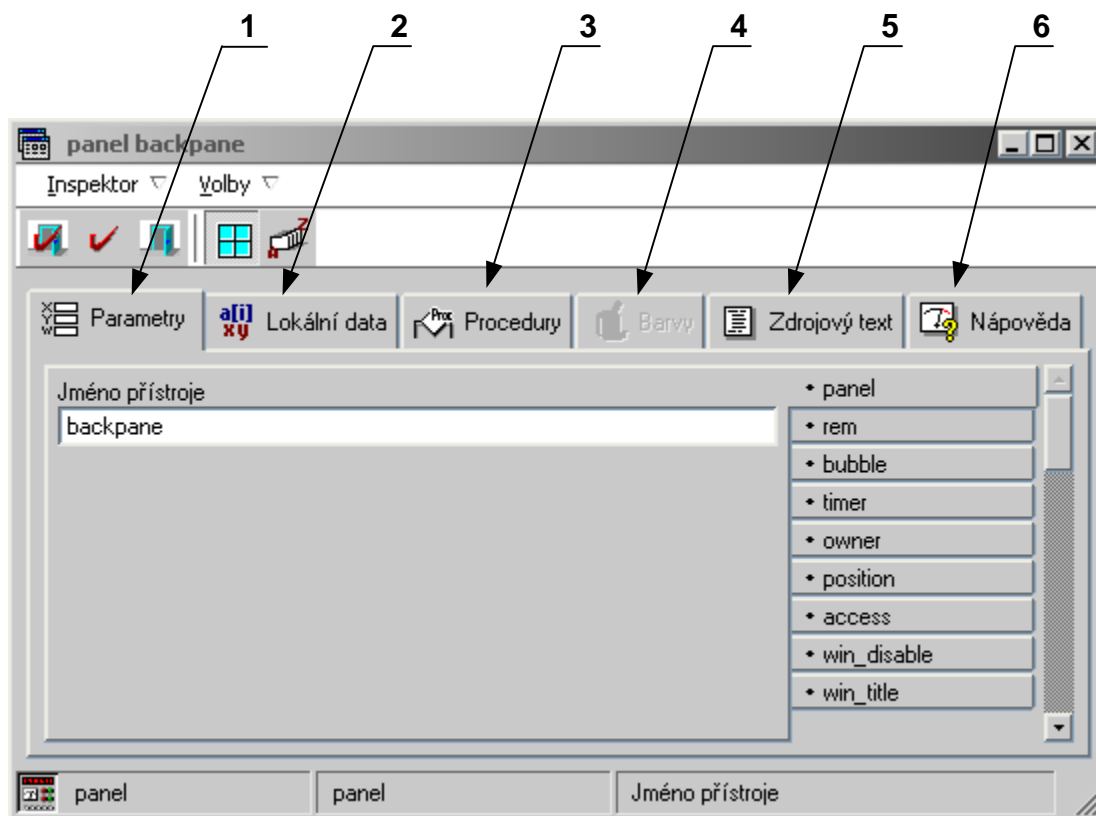
 Spuštění aplikace. Lze provést pouze tehdy, není-li již regulace spuštěna v jiném otevřeném projektu. Této funkce lze rovněž dosáhnout pomocí klávesové zkratky F5. Spuštění aplikace je doprovázeno průběžnou inicializací dat, jednotlivých přístrojů, globálních proměnných, výstupních kanálů a zajištění plynulého rozběhu časování. Každý přístroj během inicializace může ovlivňovat datové elementy, může spouštět událostní procedury a posílat zprávy jiným přístrojům.



Zastavení běžící aplikace.

Nastavení vlastností a chování přístrojů

Nastavení vlastností jednotlivých objektů lze zpřístupnit kliknutím pravého tlačítka myši na požadovaný přístroj (objekt). Tím se aktivuje kontextové menu objektu a zvolením položky *Inspektor přístroje* bude otevřen dialog umožňující změnit vlastnosti a nastavení objektu (obr. 13). [7]



Obr. 13. Popis a vlastnosti nastavení přístroje

1. Nastavení kanálů, časování, pozice přístroje, vlastníka přístroje, názvu archivačního souboru apod.
2. Definice datových elementů (konstant, proměnných, staticky proměnných)
3. Nastavení procedur, které se mají provést při určité události (např. při stisku klávesy)
4. Změna barvy, vzhledu přístroje
5. Zdrojový kód přístroje (je tady pouze zdrojový kód, který náleží k danému přístroji)
6. Elektronická nápověda CW, která náleží k zvolenému virtuálnímu přístroji.

Virtuální přístroje využívající standardní, tj. *dvourozměrné* vykreslování, vždy samostatně zajišťují překreslení své plochy prostřednictvím GDI systému Windows. Mohou se tedy překreslit kdykoliv bez ohledu na ostatní komponenty a dokonce i na panel, na jehož ploše leží. Když se takové přístroje překrývají, dá se to snadno vyřešit rozdělením překrytého přístroje na několik obdélníků a jejich postupným překreslením. [7]

U *trojrozměrných virtuálních přístrojů* je situace složitější. Každý je v třírozměrném prostoru scény složitě překrýván částmi jiných přístrojů. Proto musí být při změně každého přístroje vždy překreslena celá scéna. V systému CW je překreslování řešeno principem klient – server.

Požaduje-li virtuální přístroj překreslení, pouze tento požadavek oznámí serveru a dále se o něj nestará. Toto zaregistrování požadavku přístroj nijak časově nezatěžuje a aplikační program běží velmi plynule v přesném reálném čase. Jakoby grafika vůbec neexistovala.

Server, který zabezpečuje překreslování scény, běží ve vlastním samostatném prováděcím toku. Rychlost překreslování scény je pak dána její složitostí a výkonem grafické karty a procesoru počítače. Vzhledem k výkonu dnešních akcelerátorů jsou i velmi složité scény s mnoha tisíci polygony překreslovány rychleji než stokrát za sekundu. To aplikačním programům přináší dramatické zvýšení výkonu a kvality grafiky, které je v plošné GDI grafice nedosažitelné. [7]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 TVORBA APLIKACE V PROSTŘEDÍ CONTROL WEBU

4.1 Karta Advantech PCI 1716

4.1.1 Popis karty Advantech PCI 1716

Karta obsahuje 16 jednoduchých analogových vstupů, ke kterým využívá 16 bitový A/D převodník s až 250kHz vzorkovacím kmitočtem. Podle potřeb uživatele se může nastavit různý zisk pro každý kanál v odpovídajícím rozsahu vstupního napětí. Ziskové hodnoty jsou uloženy v paměti SRAM. [13]

Možnost nastavení zisku (gain) udává rozlišení převodníku a tudíž i chyby měření. Pro zjištění odhadu nejistoty měřicí karty (viz. tab. 2) bylo použito následující vzorce:

$$\text{rozlišení převodníku} = \frac{U[V]}{2^n} [V] \quad (26)$$

$$\text{standardní odchylka} = \text{rozlišení převodníku} / 2 \quad (27)$$

Tab. 2. Výpočet odhadu nejistoty měřicí karty

U[V]	2 ⁿ	Rozlišení převodníku [V]	Standardní odchylka [V]	Hodnota Gain
±10	65536	0,000305176	0,000152588	4
±5	65536	0,000152588	0,000076294	0
±2,5	65536	0,000076294	0,000038147	1
±0,125	65536	0,000038147	0,000019073	2
±0,625	65536	0,000019073	0,000009537	3

Poznámka:

n- udává kolika bitový má karta převodník

Do parametrického souboru se запиše hodnota Gain (číslo viz. Tab.2.) podle toho, jaký potřebujeme vstupní rozsah kanálu. Při použití jiného typu měřicí karty nelze použít předchozí údaje uvedené v tabulce, ale je nutné prostudovat ovladače CW, jelikož jsem zjistil, že označení gainů pro aplikaci nesouhlasí s obecným manuálem dodávaným firmou

Advantech. Dále karta obsahuje dva 16-bitové analogové výstupní kanály, 16 číslicových vstupů a 16 číslicových výstupů společně s programovatelným čítačem, který může sloužit jako spoušť pro A/D komunikaci. Čítací čip je 82C54, který připojuje tři 16 bitové kanály na frekvenci 10 MHz hodinového impulsu.

Jeden ze tří kanálů je užíván jako událostní čítač pro vstupní kanály. Další dva slouží pro synchronizaci 32 bitových časovačů.[13]

Na plošném spoji měřicí karty je umístěna FIFO vyrovnávací paměť – *buffer*. Paměťový *buffer* slouží k uložení dat do paměti A/D vzorků. Karta se používá při procesech monitorování a ovládání, zároveň slouží jako převodník pro sensorové měření a pro vícekanálové měření stejnosměrného napětí. Flexibilní design umožní vícekanálové a vysokorychlostní vzorkování pro výkonné získávání informací. Dokumentace k této kartě je uvedena v příloze P I.

Při práci byla využita multifunkční karta PCI 1716 (viz. obr.14), kabel se samčími konektory na obou stranách typ PCL 10168, deska svorkovnice ADAM 3968 a instalační CD. Veškeré příslušenství karty včetně instalačního CD bylo dodáno firmou Advantech.

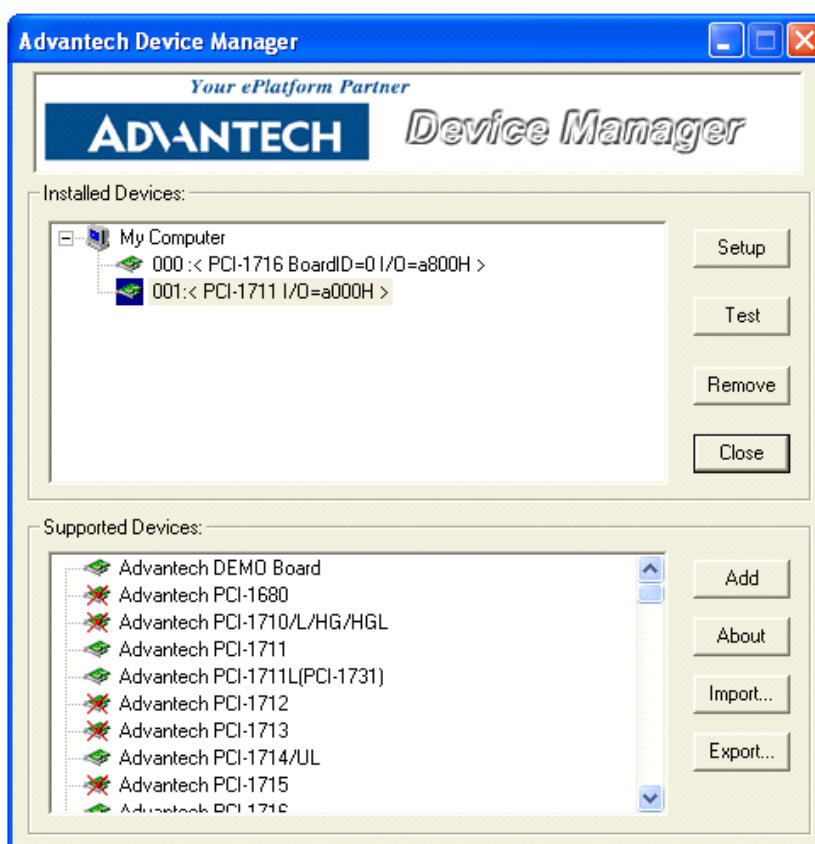


Obr. 14. Multifunkční karta PCI 1716

4.1.2 Instalace karty

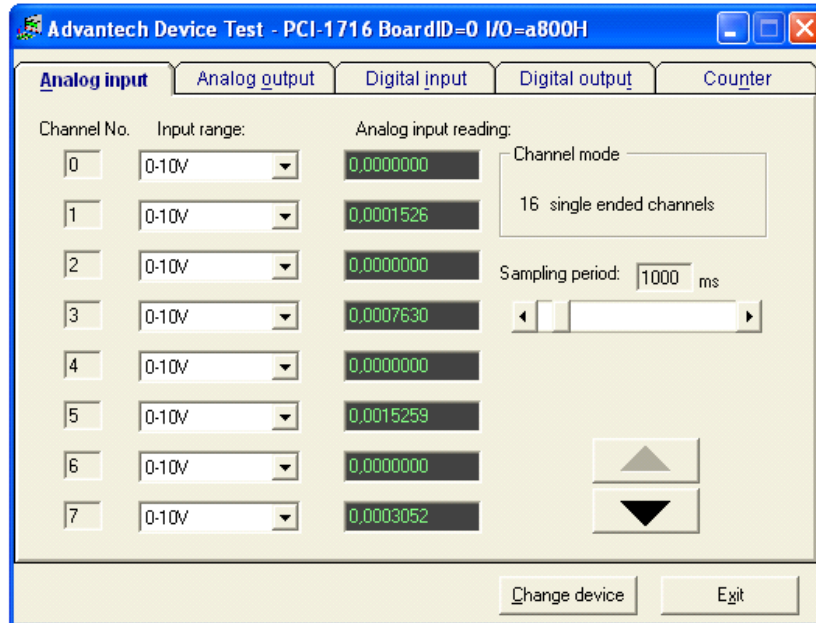
Pro potřeby této práce byla u firmy Advantech zakoupena karta PCI 1716, která slouží k zajištění vstupně/výstupní komunikace.

Karta byla vložena do PCI slotu počítače. Pro její správný chod ve Windows XP bylo zapotřebí nejprve nainstalovat program Advantech Device Manager, který byl součástí CD od firmy Advantech, a který je určen k testování funkčnosti karty. Poté se musí nainstalovat ovladač příslušné karty v našem případě *Advantech Device Driver* pro Windows XP – PCI 1716.



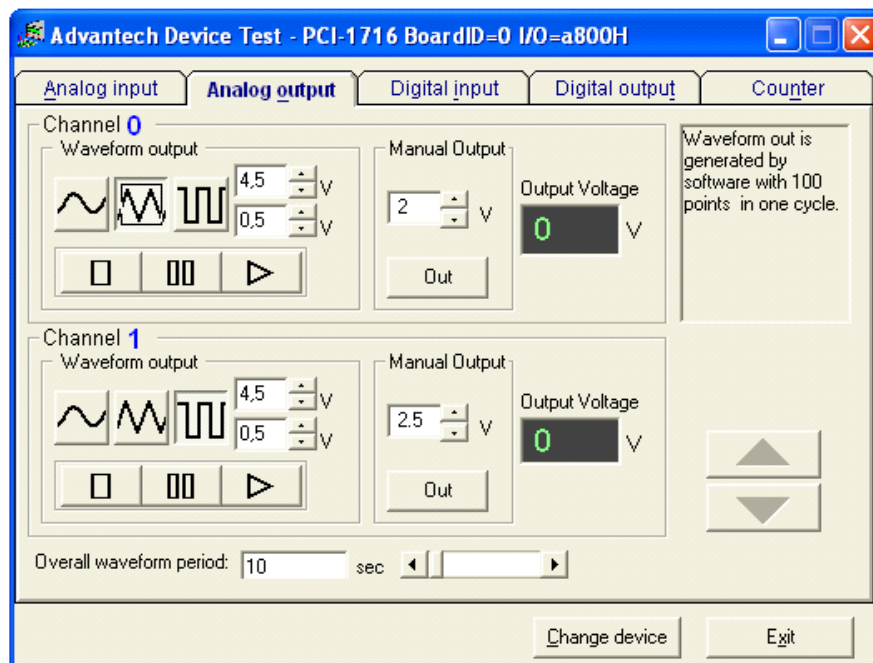
Obr. 15. Spuštění programu Device Manager

Po provedení instalace se karta zobrazí ve *Správci zařízení*. Protože již v počítači byla starší karta s 12bitovým převodníkem došlo ve správci zařízení k indexaci karet. Karta PCI 1716 je na první pozici a byl jí přidělen index 0, kartě PCI 1711 byl přidělen index 1. Index karty je důležitým parametrem při použití ovladače pro rychlé děje. Spuštěním testu v *Device Manageru* se ověří průběh komunikace viz. obr. 16 a obr. 17.



Obr. 16. Okno testu v Device Manager (analogový vstup)

Pozn.: V okně testu je zachyceno 16 analogových vstupů, které lze volit v rozpětí $\pm 10\text{ V}$, $\pm 5\text{ V}$, $\pm 2,5\text{ V}$, $\pm 1,25\text{ V}$ nebo $\pm 0,625\text{ V}$. Vzorkovací periodu lze nastavit na minimální hodnotu 200 ms .



Obr. 17. Okno testu v Device Manager (analogový výstup)

Pozn.: V programu lze pro analogový výstup nastavit manuálně napětí (ve V) nebo nastavit průběh opakujícího se signálu (sinusovku, pilu, obdélníkový průběh) v předdefinovaných mezích. Dále lze volit periodu vzorkování průběhu.

4.2 Instalace Control Webu 2000

Dodavatelem programu CW je firma Moravské přístroje a. s. se sídlem ve Zlíně. Program je nabízen ve dvou verzích (*vývojová* a *runtime* verze). Pro tuto práci byla zvolena instalace *vývojové* verze tohoto programu, která umožňuje tvorbu nového prostředí. Runtime verze je určena převážně ke spuštění již hotové aplikace, neumožňuje žádné změny.

Po úspěšném provedení instalace CW je zapotřebí ještě nainstalování ovladačů podporujících komunikaci mezi prostředím (CW) a kartou (Advantech).

Jedná se o následující ovladače:

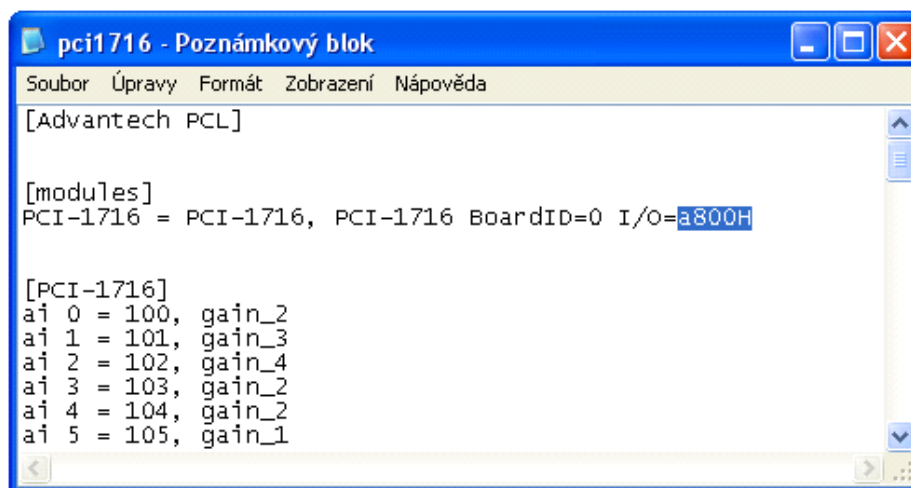
- *ovladač pro normální děje* (perioda vzorkování u analogových vstupů do 200 ms tj. 5 Hz) verze 4.1
- *ovladač pro rychlé děje* (vzorkovací frekvence řádově desítky kHz) verze 4.3 [15]

Po ukončení instalace CW a obou ovladačů lze spustit zkušební program pro ověření funkčnosti komunikace mezi kartou a prostředím CW. Cesta k adresářům daných ovladačů je C:/ProgramFiles/ControlWeb/Examples/ADVPCI (pro *normální děje*) a ADVBUF (pro *rychlé děje*). Tato cesta je již předdefinována při instalaci CW, ale může být i uživatelem změněna.

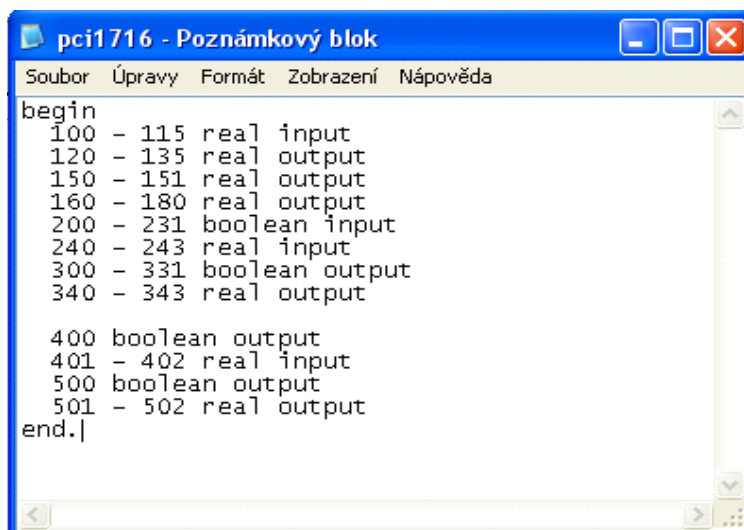
4.2.1 Ovladač ADV PCI pro normální děje

Ovladač je koncipován jako univerzální nástroj pro všechny PCI karty. Může obsluhovat jednu nebo několik PCI karet. Pro konkrétní použití se konfiguruje prostřednictvím parametrického souboru, který je umístěn v adresáři příslušné karty. V tomto případě se jedná o adresář pro kartu 1716.

Nachází se zde soubory PCI 1716.par viz. obr. 18 (Obsahuje název karty + hexa číslo; toto číslo musí korespondovat s hexa číslem dle Device Manageru, aby byla zaručena funkčnost aplikace.), PCI 1716.dmf (obsahuje čísla kanálů a jejich typy) a PCI 1716.cw (grafická aplikace v CW určená pro testování komunikace).



Obr. 18. Změna hexa čísla v souboru PCI 1716.par



Obr. 19. Nastavení typů kanálů v souboru PCI 1716.dmf

Pozn.: Jestliže nainstalovaný ovladač pro pomalé děje neobsahuje podporu dané karty je zapotřebí použít novější verzi ovladače popř. porovnat vlastnosti vaší karty s některou z karet ovladačem podporovaných a v jakémkoliv textovém editoru upravit obsah souboru *.par podle vašich požadavků. (označení karty, hexa číslo karty, rozsahy vstupů, ..).

Soubor je poté potřeba pojmenovat podle typu karty. Soubor s koncovkou *.dmf má obecný charakter, proto není potřeba jeho obsah při změně karty měnit, postačí pouze změnit jeho název podle typu karty.

V rámci této diplomové práce je uvažováno i měření rychlých dějů. Z tohoto důvodu je věnována větší pozornost ovladačům pro rychlé děje. Ovladače pro *normální děje* zde nejsou více popsány, protože se jimi zabývalo již mnoho diplomových prací. Podrobnější informace o jednotlivých nastaveních lze získat v nápovědě CW pro daný ovladač (ovladač pro normální děje).

4.2.2 Ovladač ADVBUF pro rychlé děje

Ovladač ADVBUF je určen pro rychlé čtení dat z měřicích karet od firmy Advantech a k přenosu těchto hodnot prostřednictvím kanálu typu *buffer* do aplikace systému CW. Pro spuštění převodu hodnot z analogových vstupů se využívá hardwarové přerušení.

Adresář ADVBUF obsahuje několik příkladů pro zjištění funkčnosti karty pro rychlé děje (spuštění aplikace). V parametrickém souboru u rychlých dějů již není uvedeno jméno karty a hexa číslo, ale je zde index daného zařízení a jiné nastavující parametry (vzorkovací frekvence, nastavení FIFO, atd.)

Kromě toho ovladač umožňuje číst analogové a digitální vstupy karty a nastavovat analogové a digitální výstupy karty. Ke své činnosti ovladač vyžaduje nainstalovanou a správně nakonfigurovanou programovou podporu od Advantechu (verze 1.3 a vyšší) [7].

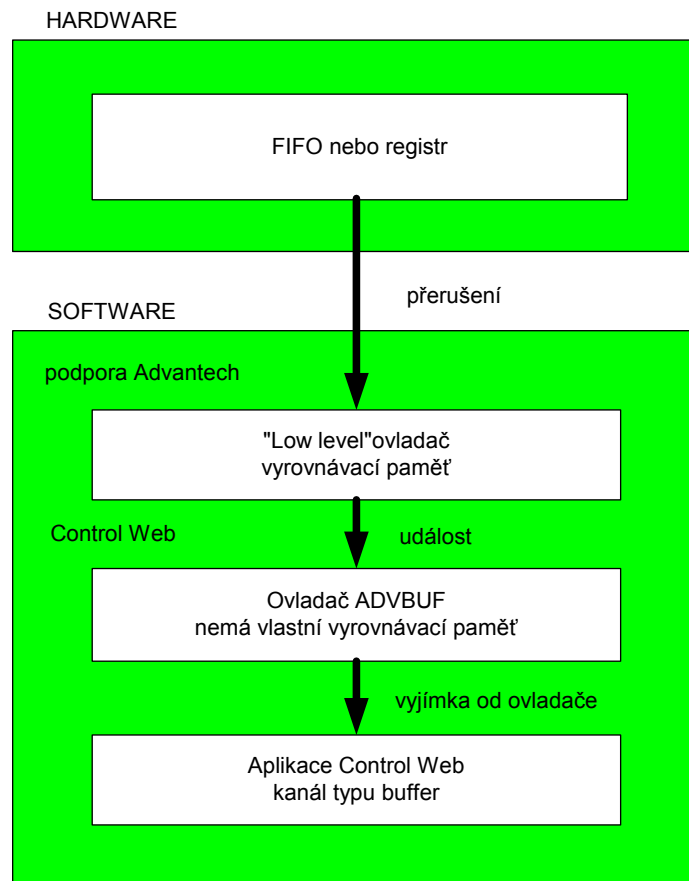
Činnost ovladače

Karta vzorkuje vstupní signál z jednoho nebo několika vstupů zadanou vzorkovací frekvencí. K tomu je využit programovatelný časovač, který je umístěn přímo na měřicí kartě. Rozsah vzorkovací frekvence se dá programově měnit.

Rozsah (zpravidla jeho horní limit) je dán typem měřicí karty. Maximální frekvence vzorkování dosahuje řádově desítky *kHz*. Pokud se měří víc vstupů najednou, je v jedné periodě časovače změřen jeden vstup. Vzorkovací frekvence pro jeden vstup je tedy rovna nastavené vzorkovací frekvenci časovače vydělené počtem měřených vstupů.

$$\text{Vzorkovací frekvence} = \frac{\text{vzorkovací frekvence časovače}}{\text{počet měřených vstupů}} \quad (28)$$

Pro každý vstup je možno nastavit zvlášť zesílení, pokud to karta umožňuje. Změřená data se ukládají do vyrovnávacích pamětí, které mají několik úrovní (viz. obr. 20).



Obr. 20. Paměť ovladače

Na nejnižší úrovni se naměřený vzorek dat uloží buď do registru nebo do FIFO paměti. Velikost FIFO paměti má zpravidla pevnou délku, typicky 1024 vzorků. Karta vygeneruje přerušovací signál na základě změření buď jedné hodnoty (bez FIFO) nebo když se zaplní první nebo druhá polovina paměti FIFO. [7]

Přerušení zachytí operační systém a předá řízení ovladači, který je zpracuje.

Je to tzv. *low-level* ovladač (ovladač na nízké úrovni), se kterým spolupracuje přímo jádro operačního systému. Tento ovladač se dodává a je nainstalován jako součást podpory firmy Advantech.

Ovladač plní funkci prostředníka mezi aplikací a *low-level* vrstvou. Alokuje paměť pro nižší vrstvu, zpracovává požadavky aplikace a plní data do kanálu typu *buffer* v aplikaci. Dále volá funkce pro čtení digitálních vstupů a zápis do digitálních a analogových výstupů. Z aplikace je možno ovladač řídit buď pomocí vyhrazených kanálů nebo pomocí procedur ovladače.

Převod je spuštěn na základě požadavku aplikace. Postupně dochází k plnění *buffer* kanálu tak, že hardwarová vrstva přečte data v registru nebo zaplní část FIFO paměti. V obsluze přerušeni se plní vyrovnávací paměť *low-level* ovladače. Jakmile se tato vyrovnávací paměť zaplní do poloviny nebo celá, vznikne událost, na kterou čeká vyšší vrstva ovladače. Data jsou takto postupně přenesena do kanálu (typu *buffer*) v aplikaci.

V tomto okamžiku mohou být také zachyceny aktuální hodnoty z analogových vstupů a dále je možno fyzicky ukončit převod (byla-li předtím vyvolána operace pro zastavení převodu). Když je *buffer* kanál naplněn, ovladač vygeneruje do aplikace výjimku, která je zpracována některým z virtuálních přístrojů. [15]

Režimy měření

Pro získávání dat z měřicí karty existují dva režimy. Volba režimu se děje prostřednictvím nastavení v parametrech ovladače.

- *Spojité převod* se odstartuje povelom z aplikace. Postupně dochází k plnění *buffer* kanálu. Jakmile je naplněn, vygeneruje se výjimka od ovladače. Při jejím zpracování dochází zároveň k novému plnění vnitřní vyrovnávací paměti a následně *buffer* kanálu. Při jeho naplnění se vygeneruje nová výjimka od ovladače. Tento cyklus pokračuje dokud není převod ukončen povelom z aplikace.
- *Jednorázový převod* se také odstartuje povelom z aplikace. Postupně se plní *buffer* kanál a jakmile je ukončen, je převod zastaven a generuje se výjimka od ovladače. Nový převod se spustí novým povelom z aplikace.

Spuštění převodu (trigger) a automatické nastavení

Spojité i jednorázový převod může být spuštěn jedním ze třech způsobů:

- *Externě* - spouštění pomocí signálu připojeného na zvláštní vstup karty.
- *Programově* - ke spuštění převodu do *bufferu* dojde okamžitě po zadání požadavku na převod.
- *Napětovou úrovní* - ke spuštění převodu do *bufferu* dojde po zadání požadavku, ale až když napětí na vybraném vstupu dosáhne definované hodnoty a směru.

Ovladač si nastavuje většinu svých parametrů automaticky podle definice *buffer* kanálu v aplikaci. Pouze režim činnosti a parametry měření, jako je vstupní zesílení a vzorkovací frekvence, je třeba definovat v jeho souboru parametrů.

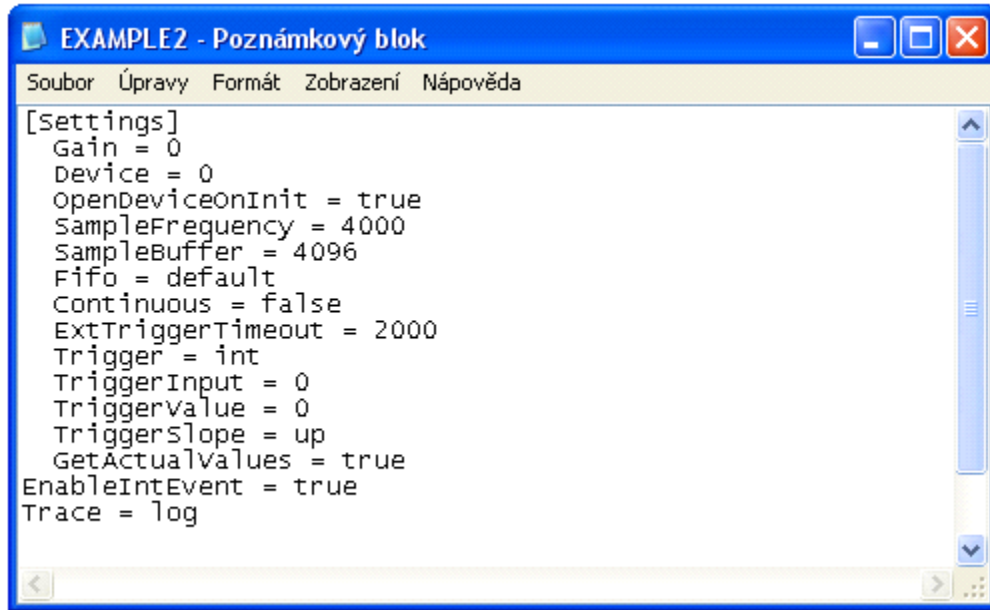
U externího způsobu spouštění je nutno definovat *timeout* parametr. Typ dat *buffer* kanálu je určen jejich definicí v aplikaci. Přípustné jsou pouze typy *cardinal* (16 bitů bez znaménka) nebo *shortreal* (real 4 byte). Jinak je při startu aplikace vypsáno chybové hlášení. [15]

Parametry a kanály ovladače

Činnost a chování ovladače se dá ovlivnit nastavením jeho parametrů. Ty se zapisují do souboru (textový soubor upravitelný běžným textovým editorem), který se zadává v definici ovladače v aplikaci systému CW.

Parametry mohou být rozděleny do několika skupin - sekcí. Každá sekce má svoje jméno uvedené v hranatých závorkách a dále seznam několika parametrů tvořených jménem, oddělovacím znakem (rovnítko) a jednou nebo více hodnotami parametru.

Ovladač ADVBUF v současné době používá jedinou sekci - **Sekce [Settings]**. Tato sekce obsahuje veškeré parametry pro nastavení ovladače. V našem případě se jedná o parametrický soubor *example2.par* (viz. Obr.21). Jak již bylo dříve zmíněno neuvádí se do parametrického souboru jméno zařízení, ale pouze jeho index. Dalšími parametry mohou být zesílení jednotlivých vstupů, režim činnosti ovladače, perioda vzorkování, způsob spouštění převodu a velikost vyrovnávací paměti.



```
[Settings]
Gain = 0
Device = 0
OpenDeviceOnInit = true
SampleFrequency = 4000
SampleBuffer = 4096
Fifo = default
Continuous = false
ExtTriggerTimeout = 2000
Trigger = int
TriggerInput = 0
TriggerValue = 0
TriggerSlope = up
GetActualValues = true
EnableIntEvent = true
Trace = log
```

Obr. 21. Parametrický soubor pro rychlé děje

Současné použití některých parametrů se vzájemně vylučuje nebo ovlivňuje. Proto je nutné znát přípustné kombinace parametrů a z toho odvodit jejich optimální nastavení. Ovladač má pevnou množinu kanálů, která se vztahuje k právě otevřenému zařízení.

Kanály je možno rozdělit podle funkce do několika skupin:

- Přenos hodnot z/do ovladače
- Řízení činnosti ovladače
- Získání stavových informací o ovladači

Typy kanálů ovladače a čísla kanálů, která jsou volitelná, jsou obsaženy v mapovacím souboru. Jedinou výjimku tvoří kanály analogových vstupů, a to jak *buffer* kanály, tak kanály s aktuálními hodnotami. U těch jsou přípustné pouze již zmiňované typy *cardinal* nebo *shortreal*.

Podrobnější informace o jednotlivých nastaveních lze dále získat v nápovědě CW pro daný ovladač (ovladač pro rychlé děje).

4.3 Tvorba aplikace

4.3.1 Virtuální přístroje

Před započítím práce je nutné seznámit se s prostředím CW viz. teoretická část kap. 3. Při tvorbě nové aplikace v CW se spuštěním programu zobrazí průvodce, ve kterém se zvolí typ a důležité vlastnosti a parametry nově tvořené aplikace.

Záložka *Grafický editor* v aplikaci slouží k vizualizaci virtuálních přístrojů, které jsou při práci používány. Všechny možnosti výběru jednotlivých virtuálních přístrojů (dále jen přístroje) se nalézají v *Paletě přístrojů*.

V rámci této práce byly použity následující přístroje:

Meter, control, buffer displej, switch, pipe, thermometer, engine, indikátor, archiver, label, draw, buffer convertor.

U těchto přístrojů se upraví jejich velikost a zvolí vyhovující mód. Jakmile jsou přístroje graficky upraveny, definují se v *Datových inspektorech* proměnné. Každá proměnná má nějaký *datový typ* tzn. druh dat, které uchovává. Díky těmto proměnným jsou podle požadavků uživatele propojeny dané virtuální přístroje.

4.3.2 Propojení virtuálních přístrojů:

Po definici proměnných se uživatel opět vrací do *Grafického editoru*, kde u zvoleného virtuálního přístroje z palety přístrojů např. *control* definuje *output* jako danou proměnnou a u druhého přístroje např. *meter* volí tutéž proměnnou jako *expression*. Pro správnou funkci přístrojů je ještě nutné nadefinovat *timer* (časovač nebo časový krok). Jedná se o periodu vzorkování, která může nabývat hodnoty v intervalu:

- 0.2, což je nejmenší perioda 200 *ms* daná kartou PCI 1716 nebo
- *infinite* – nekonečno.

Toto je nejjednodušší možný popis propojení virtuálních přístrojů. V této fázi lze spustit tuto jednoduchou aplikaci a ověřit si tak správnost propojení a funkčnost přístrojů. [10]

4.3.3 Práce s ovladači a kanály

Další součástí práce je definování ovladačů v *Datových inspektorech*. Pro tuto práci jsou definovány dva ovladače:

- *pro normální děje* – Advantech PCLabCard verze 4.1
- *pro rychlé děje* - Advantech PCLabCard verze 4.3

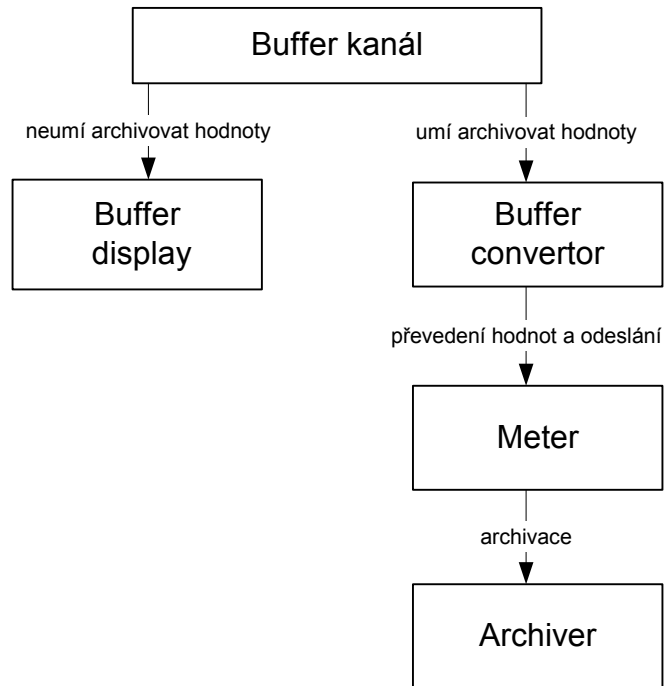
Těmto ovladačům se přiřadí jméno a nadefinují se mapovací a parametrické soubory. Parametrické soubory slouží ke konfiguraci ovladače (nastavení komunikace se vstupně/výstupním zařízením, mapování kanálů do paměti vstupně/výstupního zařízení pomocí mapovacího souboru, další informace ovlivňující funkčnost ovladače).

V mapovacích souborech je uložena informace o typech a směrech všech kanálů, které jsou spojeny s daným ovladačem. Jsou vždy textové a dají se editovat v *Datových inspektorech* v záložce *Ovladače*. Tyto soubory jsou umístěné v adresáři, kam byli nainstalovány dané ovladače.

Po definici ovladačů se následně definují *kanály*, taktéž na záložce *Datový inspektor*. Udává se zde jméno, ovladač, číslo, typ, směr a hodnota popř. timeout a poznámka. Hodnoty jsou zapisovány do výstupních kanálů a čtou se ze vstupních kanálů.

V první fázi práce s *buffer* kanály je potřebné zvolit jejich velikost. U této aplikace jsou definovány dva kanály na pevný počet vzorků 512 na jeden *buffer* kanál, celkem tedy 1024 vzorků.

U *buffer* kanálů jsou pro zobrazení potřebné *buffer displeje*, ale bohužel z nich není možné archivovat hodnoty. Proto je zapotřebí zavést *buffer convertor*, který převede grafické údaje na hodnoty a odešle je do přístroje *meter*, odkud se poté archivují všechna potřebná data (viz. obr. 22).

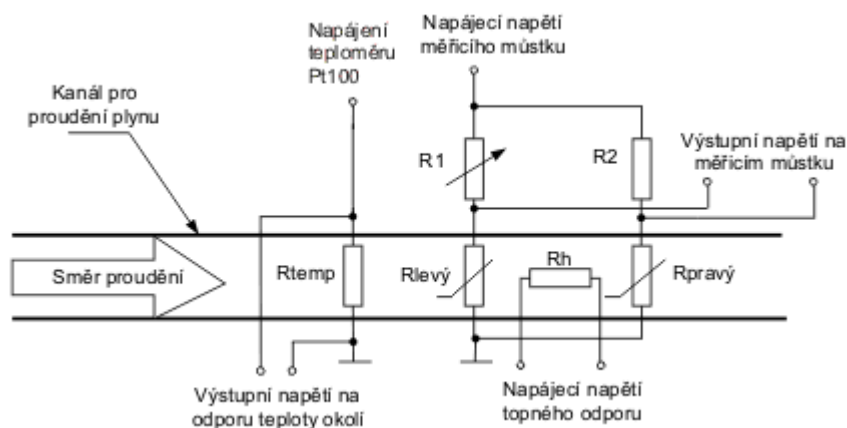


Obr. 22. Postup archivace dat u buffer kanálu

Spuštění zmiňovaných *buffer* kanálů je možné jen v případě, je-li správně nainstalován ovladač pro *rychlé děje*. Při vývoji aplikace lze libovolně přidávat, odebrat nebo editovat kanály a to buď v textovém módu nebo v *Datových inspektorech*. Tato problematika je poněkud rozsáhlejší, proto odkazují na literaturu. [15]

4.3.4 Výsledná aplikace

Vzhled výsledné aplikace v prostředí CW byl navržen podle následujícího schématu (viz. obr. 23), ve kterém jsou vysvětleny jednotlivé veličiny měření.



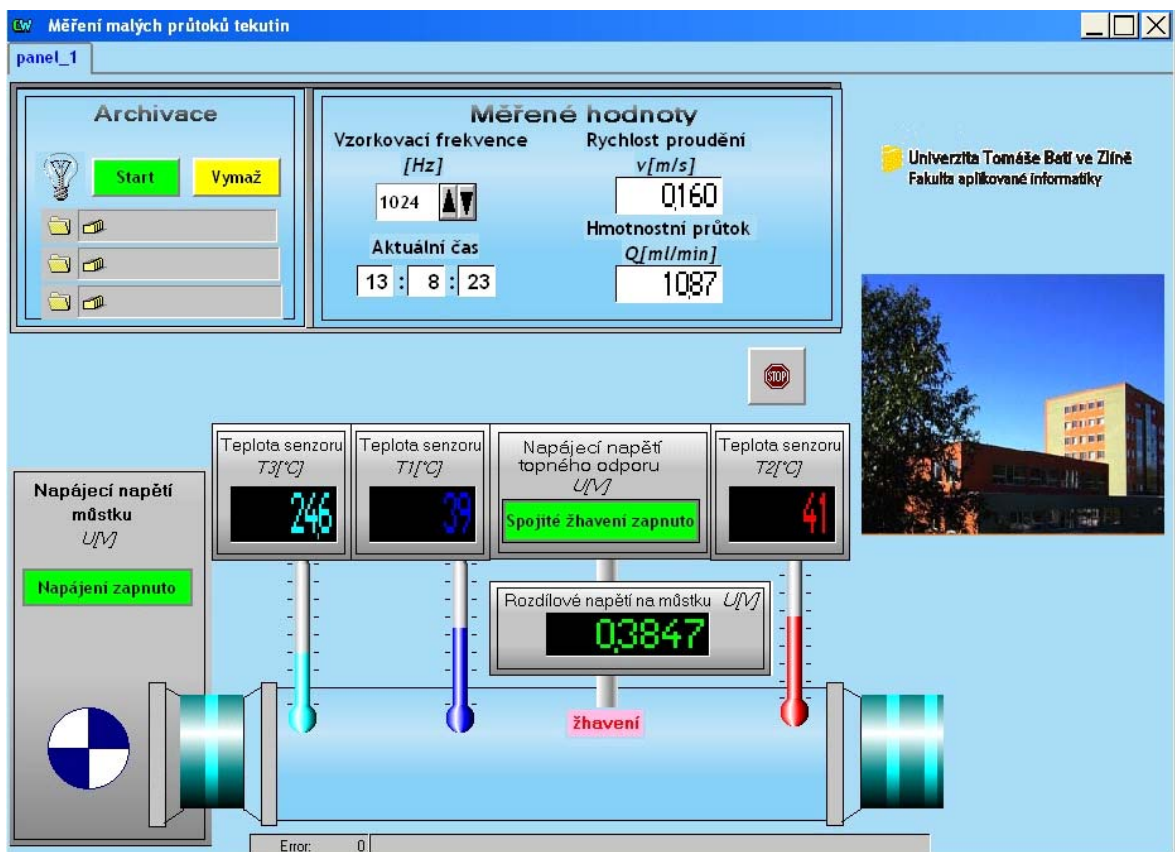
Obr. 23. Schéma měření s uvedením jednotlivých veličin

Odpory $R_{levý}$ a $R_{pravý}$, představující teploty T_1 a T_2 , jsou zapojeny v můstku a napájeny vhodným napětím. V tomto případě je napájení 2 V.

Vytvořená aplikace (viz. obr. 24) obsahuje údaje o dosahované teplotě T_1 (levého senzoru) a T_2 (pravého senzoru) ovlivněné topným odporem uprostřed. Teploměr T_3 by měl zobrazovat teplotu okolí, na níž jsou měření průtoku nezávislá.

U topného odporu je možné nastavit libovolné napájecí napětí v rozsahu do 2V. Protože měřicí karta PCI 1716 má omezený proudový výstup nebylo možné napájet topný odpor přímo z aplikace. Volba napětí se proto provádí na externím zdroji. U spojitého topení je pro účely tohoto měření napájecí napětí topného odporu 1,16V. Pro pulzní topení je napětí topného odporu také 1,16V ovšem lze volit délku impulsu a to v textovém editoru aplikace. Všechny teploměry spolu s topným odporem jsou umístěny v jednom společném kanále.

Dále jsou v aplikaci zobrazovány hodnoty rychlosti proudění v [m/s] a objemový průtok Q [ml/min]. Výstupní napětí na měřicím můstku po zesílení je zobrazeno mezi teplotami T_1 a T_2 v dolní části aplikace.



Obr. 24. Výsledná aplikace

Pro archivaci naměřených hodnot jsou určena tlačítka v levém horním rohu aplikace. První archiver obsahuje hodnoty *buffer* kanálů a druhý uchovává hodnoty teplot T_1 , T_2 , T_3 , průtoku Q a napětí na můstku.

Snímané hodnoty jsou archivovány do předdefinovaného adresáře a do předem nadefinovaných a pojmenovaných souborů *archivace T₁ a T₂.xls.* a *buffery.xls.* Struktura archivace je koncipována jako tabulka, kde v každém sloupci jsou zaznamenány dané hodnoty, které jsou dále zpracovávány a vyhodnocovány v programu Excel.

Z aplikace je možné volit periodu vzorkování, ne však libovolně. Tato hodnota musí padnout do posloupnosti dané generátorem hodin na kartě. Při této práci se zadává perioda vzorkování jako násobky 32. Tlačítkem STOP, umístěným nad ukazatelem teploty T_2 , lze celou aplikaci ukončit.

5 PRŮTOKOVÝ SENZOR FS2/FS2T A NÁVRH KANÁLU

5.1 Popis produktu

Senzor se skládá ze tří nebo čtyř teplotně závislých platinových odporů podle typu FS2 nebo FS2T. Nízko-ohmový odpor s malou plochou se užívá jako topný, zatímco dva vysoko-ohmové odpory vpravo a vlevo se používají pro měření hmotnostního průtoku a jeho směru. Tyto dva senzory umístěné po stranách topného odporu jsou spojené v můstkového zapojení. Rozvážení můstku dává jednoznačné informace o velikosti a směru toku.

Výhody průtokových senzorů FS2/FS2T

Nalezení směru proudění, malé hmotnostní průtoky, jednoduché zpracování signálu, necitlivý k znečištění, snadná reprodukovatelnost, výborná dlouhodobá stabilita, snadno přizpůsobivý pro různé aplikace, dobrý poměr cena-výkon.

Senzory se používají v automobilovém průmyslu, lékařských zařízeních, zařízeních na monitorování, v rozdílových snímačích tlaku.

5.2 Technické údaje

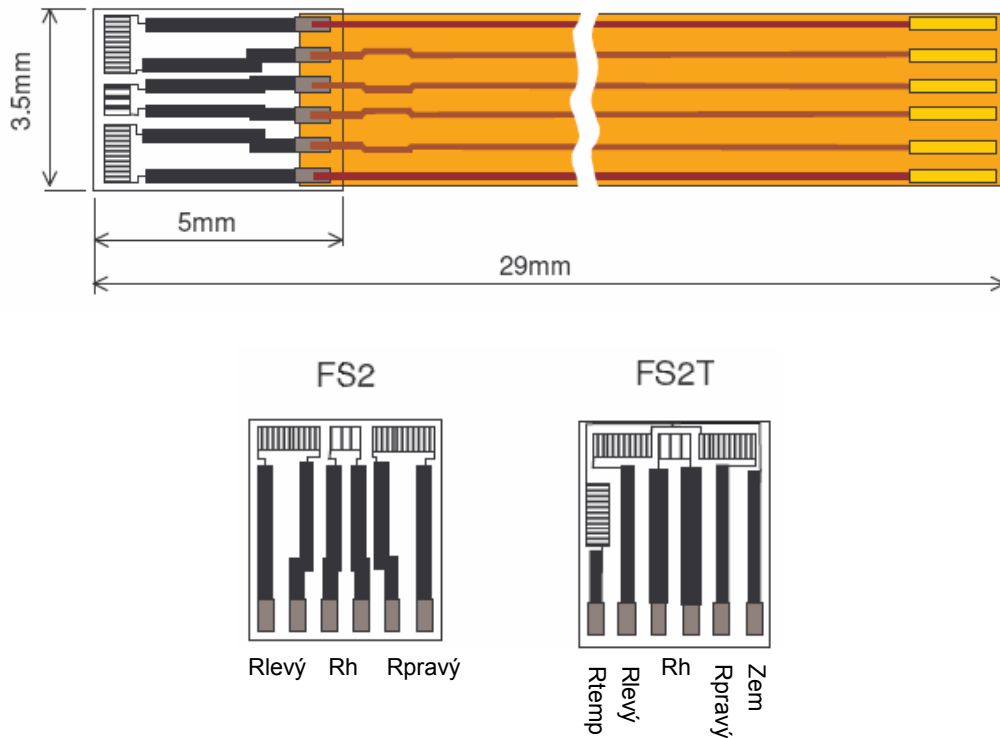
Technické údaje senzorů jsou zobrazeny v tab. 3. Údaje jsou platné pro vzduch. [12]

Tab. 3. Technické údaje senzorů

měřicí princip	teplotní
měřicí rozsah	0.001 ... 1 m/s
přesnost	< 2% aktuální měřicí hodnoty (závislá na elektronice a kalibrování)
časová konstanta topného odporu	< 1 min (v závislosti na připevnění)
časová konstanta	< 2s
pracovní rozsah teplot	+20 -60°C
teplotní citlivost	< 0.1 %/K (závislý na elektronice)
elektronický konektor	pružný, kompatibilní se ZIF spojkou
topný odpor	$R_h (0^\circ C) = 28\Omega \pm 10\%$
odporový teploměr	$R_i (0^\circ C) = 300\Omega \pm 10\%$
referenční prvek	$R_{temp} (0^\circ C) = 600\Omega \pm 10\%$ (FS2T)
potřebné elektrické napětí	typický 2 - 3 V
nosný materiál	keramika o tloušťce 0,15 mm

5.2.1 Konstrukční rozměry

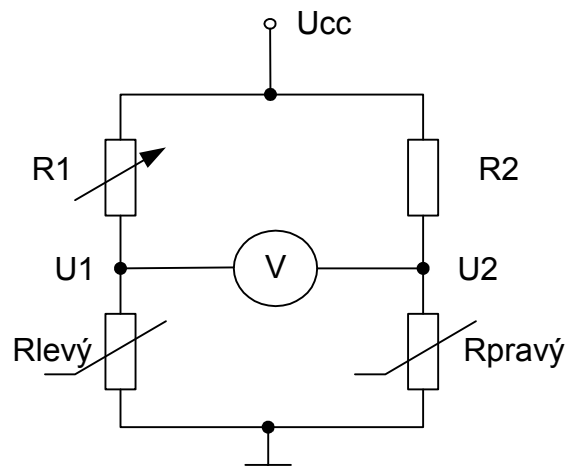
Na obr. 25 jsou uvedeny konstrukční rozměry senzoru FS2/FS2T.



Obr. 25. Konstrukční rozměry senzoru

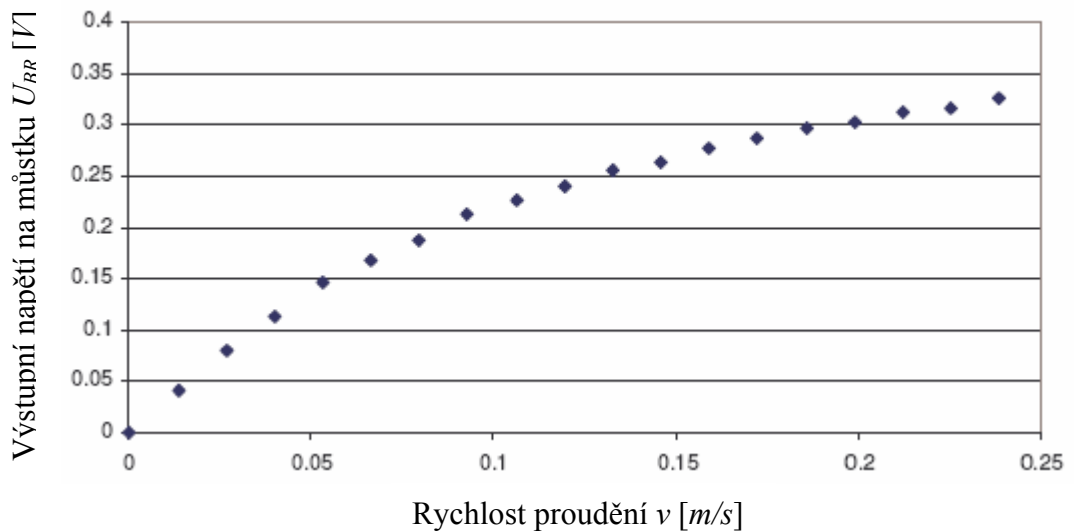
5.2.2 Elektronický obvod

Topný odpor R_H je napájen konstantním napětím. Na obr. 26 jsou ukázány dva snímací elementy ($R_{levý}$ a $R_{pravý}$), které musí být spojeny v můstkovém zapojení s konstantním napájecím napětím U_{CC} , a kde rovnováha můstku $U_{BR} = U_1 - U_2$ je závislá na hmotnostním průtoku. Odpor R_I musí být proměnný z důvodu vyvážení můstku na nulovou hodnotu za podmínky nulového proudění $U_{BR} = U_1 - U_2 = 0$ V. [12]



Obr. 26. Elektronický obvod

Při proudění je můstek rozvážen a výstupní napětí je nenulové. Velikost výstupního napětí je úměrná velikosti proudění. Tato závislost je však nelineární. Na obr. 27 je zobrazena závislost výstupního napětí měřicího můstku na rychlosti proudění plynu. Tato charakteristika je dodávána spolu se senzorem firmou IST-AG.

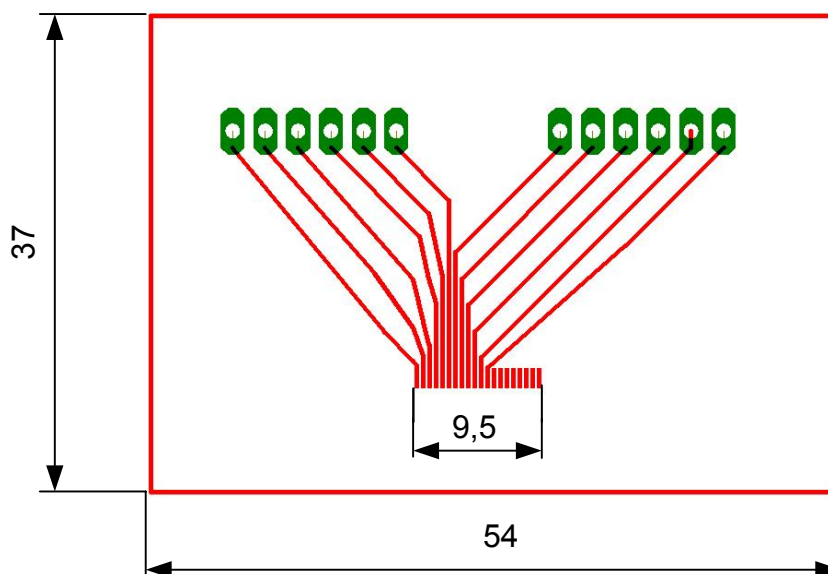


Obr. 27. Závislost výstupního napětí můstku na rychlosti proudění

Z uvedené závislosti je zřejmé, že zmiňovaný senzor je poměrně citlivý i pro malé rychlosti proudění tj. od $0 \div 0,05$ m/s. [12]

5.3 Návrh plošného spoje pro konektor senzoru

Vzhledem k tomu, že je nutné senzor propojit s měřicím můstkem, byl navrhnout plošný spoj pro konektor s označením 20FLZ pro SMD (povrchovou montáž), do kterého byl senzor zasunut. Na obr. 28 je znázorněn návrh plošného spoje s příslušnými rozměry. Realizace a návrh plošného spoje byl řešen v předešlé diplomové práci (viz. [10])

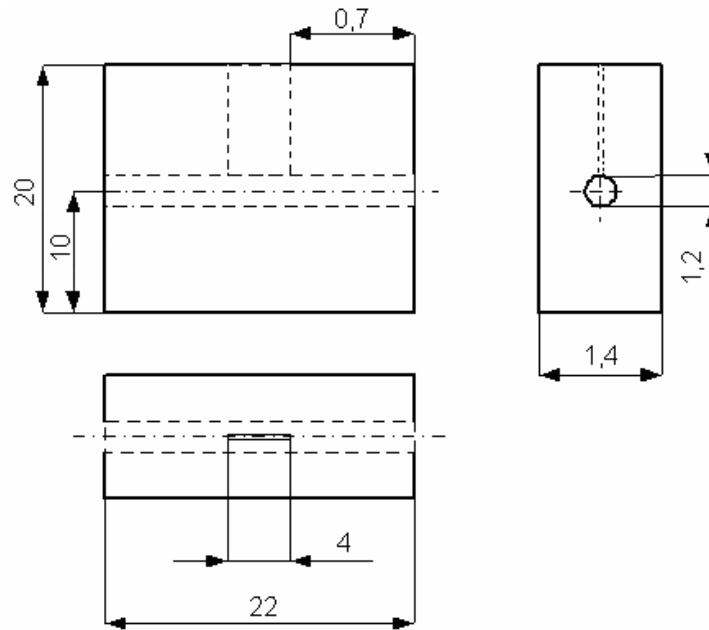


Obr. 28. Plošný spoj pro konektor senzoru

5.4 Návrh kanálu

Při návrhu kanálu je důležité zabývat se volbou vhodného druhu materiálu, který by byl dostatečně izolovaný od okolí, ale zároveň aby byl snadno opracovatelný a poskytoval dobré vlastnosti pro laboratorní měření. Testy byly prováděny s několika druhy materiálů, ale žádný z nich nebyl vyhovující. Je to dáno především vysokými tepelnými ztrátami. Jednalo se o následující materiály: silikonová hadička, izolace z měděného drátu, dřevo, lexanový profil, lisovaná skelná vata a různé druhy polystyrenů.

Při provádění testů se jako nejlepší materiál jevil tvrzený polystyren. Vlastnosti tohoto materiálu vyhovovaly požadavkům a proto byl polystyren (tvaru kostky o rozměrech 22 x 20 x 14) vybrán pro vytvoření kanálu (viz. obr.29). K jeho tvorbě se použil vrták o průměru 1,2 mm. Pro zhotovení kanálu se použila sloupová vrtačka, aby byla zaručena přesnost při vrtání kanálu. Na vrchní straně kanálu byla pomocí ostrého nožíku vytvořena drážka, do které se následně vložil senzor.



Obr. 29. Nákres kanálu

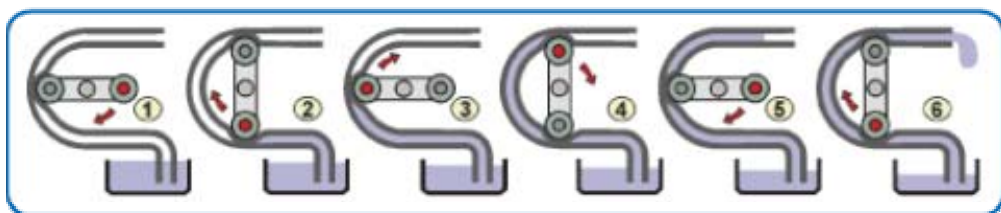
5.5 Peristaltické čerpadlo

Vzhledem k tomu že je nutné do vytvořeného kanálu se senzorem vhánět plyn, bylo pro tento účel zvoleno peristaltické čerpadlo.

Peristaltická dávkovací čerpadla využívají obecného principu rotační peristaltiky. Tím, že ke styku s čerpaným médiem dochází pouze prostřednictvím čerpací hadičky, je zajištěna těsnost a snadná dekontaminace. Volbou vhodného materiálu hadičky je možno dosáhnout široké chemické kompatibility. Tímto čerpadlem byl plyn vháněn do vytvořeného kanálu.

5.5.1 Princip činnosti peristaltického čerpadla

Na následujícím obrázku (viz. obr. 30) je znázorněn princip činnosti peristaltického čerpadla.



Obr. 30. Princip činnosti čerpadla

Čerpadla jsou samonasávací a jejich výkon je obecně dán vnitřním průměrem hadičky, otáčkami a průměrem a počtem kladiček rotoru. Nasávání čerpadla je limitováno pružností hadičky (schopností udržet geometrický tvar - nezmačknout se). Sací výšku může také ovlivnit výkon čerpadla. [17]


Nevýhodou peristaltických čerpadel je pulzující proud media, což je dáno zaškrčením hadičky kladičkou. To lze omezit vhodnou kombinací menšího průměru hadičky a vyšších otáček nebo pružnou hadičkou na výstupu čerpadla s mírným zaškrčením na konci, případně zvýšením počtu kladiček (sníží se tím ovšem podstatně výkon čerpadla).

Určitým omezením je i životnost čerpací hadičky - dle použitého materiálu hadičky a provozních podmínek je cca 50 - 1000 hodin.

5.5.2 PCD 21M

Pro naše podmínky bylo použito čerpadlo s označením PCD 21M. Technické údaje čerpadla PCD 21M jsou zobrazeny v tab. 4.

Tab. 4. Technické údaje čerpadla

	typ	PCD 21M
	výkon čerpadla CV4	0,02 - 12 ml/min
	výkon čerpadla CV2	0,007 - 3,5 ml/min
	výkon čerpadla CV1	0,001 - 0,6 ml/min
	otáčky rotoru	0,03 - 15 l/min
	stabilita otáček	lepší než 1%

Poznámka: CV X udává průměr hadičky v milimetrech.

U čerpadla jsou regulovány otáčky rotoru - tj. výkon čerpadla pomocí číslicového přepínače v rozsahu 1 – 999. Napájení je standardně ze sítě 230 V / 50 Hz. Je určeno pro běžné prostředí v izolační třídě 1 s krytím IP 20.

Medium čerpá kontinuálně s nastaveným výkonem, který je dán otáčkami rotoru čerpadla a rozměry hadičky (max. výkon je dán nejvyššími dosažitelnými otáčkami pro daný typ čerpadla a použitou hadičku). [17]

5.6 Sestavení průtokoměru

5.6.1 Komponenty pro sestavení průtokoměru

- Kanál z polystyrenu
- Senzor
- Silikonová hadička
- Peristaltické čerpadlo
- Měřicí karta
- Program vytvořený v CW

Průtokoměr se skládá z vyjmenovaných komponent, které jsou důležitou součástí pro sestavení celého průtokoměru.

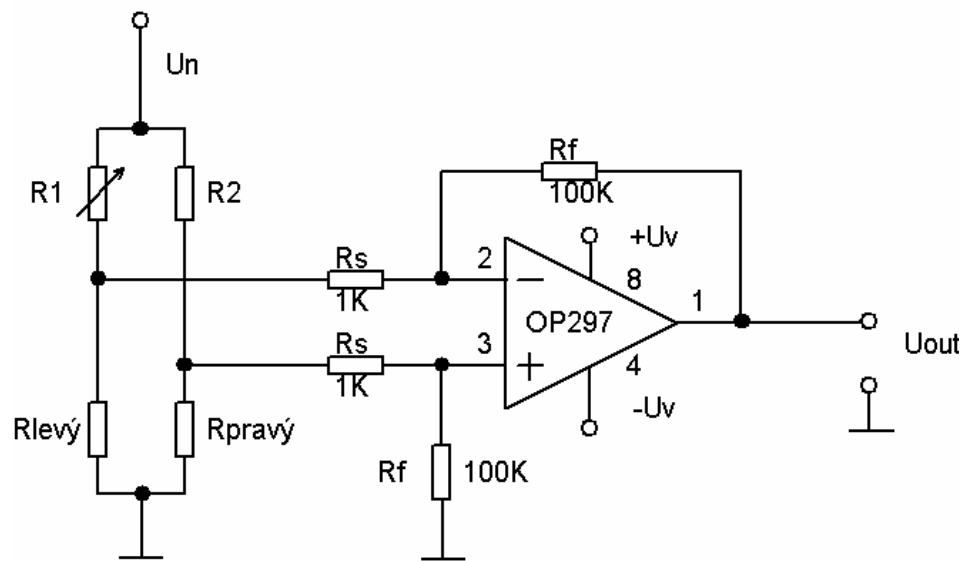
5.6.2 Postup při sestavení průtokoměru

Při sestavení průtokoměru byly využity komponenty uvedené v kapitole 5.6.1. Nejdůležitější součástí průtokoměru je senzor FS2T. Ten je dodáván švýcarskou firmou IST -AG. Firma dodává návod a rozměry tohoto senzoru (viz. kap.5.2), ale neudává žádné charakteristiky, které by blíže specifikovaly vlastnosti FS2T (jako jsou např. statické a dynamické charakteristiky). [10]

V první fázi práce se senzorem bylo nutné zjistit, jak se bude chovat. Aby bylo možno se senzorem efektivně pracovat bylo výstupní napětí můstku zesíleno nízkošumovým OZ s označením OP 297. Jedná se o nízkošumový OZ se vstupními FET tranzistory, více k popisu OZ viz.příloha P II. V zapojení napěťového zesilovače je pak zesílení dáno poměrem odporů dle následujícího vzorce:

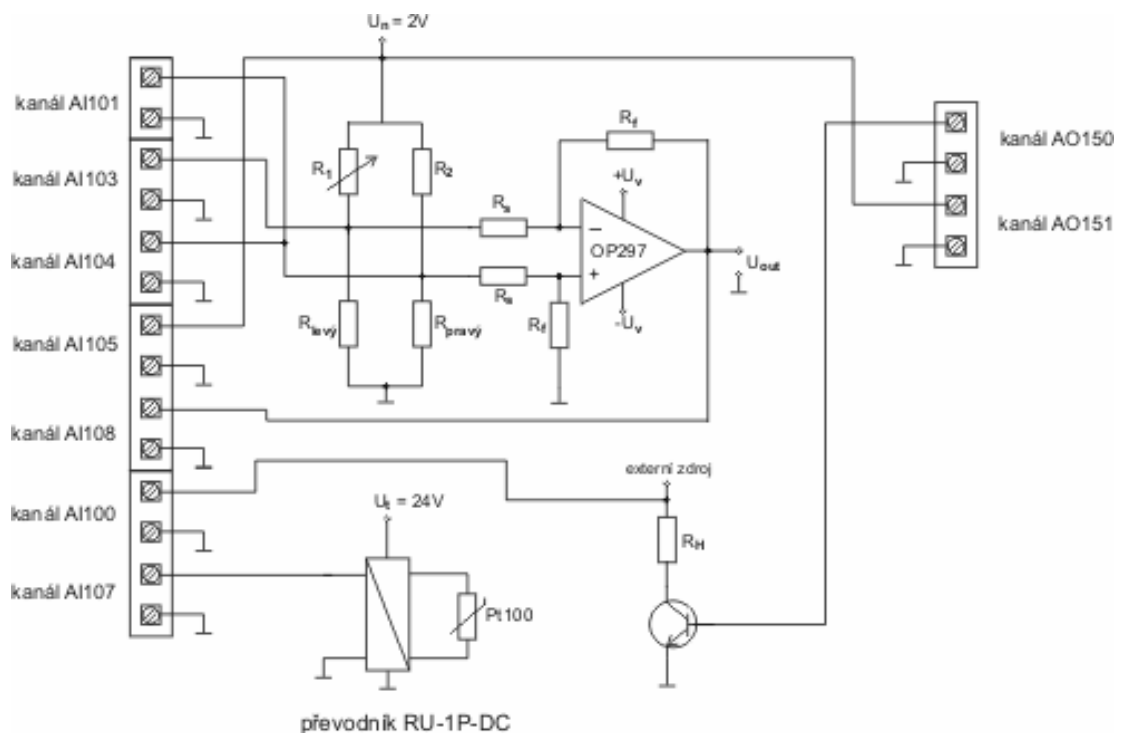
$$AU_i = \frac{R_f}{R_s} [-] \quad (29)$$

V můstkovém zapojení (viz. obr. 31) jsou obsaženy odpory senzoru $R_{levý}$ a $R_{pravý}$. Odpor R_l slouží v klidovém stavu (neproudí žádný plyn) k vyrovnání můstku, tak aby bylo rozdílové napětí nulové. V případě, že kolem senzoru proudí plyn, projeví se nerovnováha můstku, tzn. levý odpor je ochlazován proudícím plynem a pravý odpor pohlcuje teplo od topného odporu. Nerovnováha můstku je zesílena zmiňovaným OZ a následně vyhodnocena kartou.



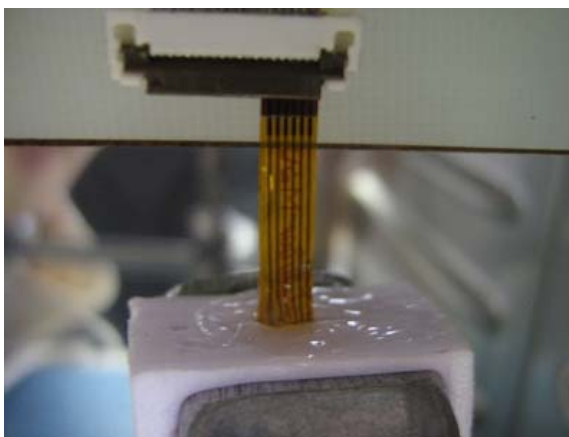
Obr. 31. Schéma zesilovače s můstkem

Na následujícím obrázku (viz. obr. 32) je znázorněno celkové zapojení senzoru, kanálů a všech potřebných součástí. Kromě můstku a zesilovače obsahuje také topný odpor R_H , odpor R_{temp} na měření teploty okolí. Ve schématu jsou zakresleny analogové vstupy (mezi které patří i *buffer* kanály) a výstupy karty a jejich propojení se senzorem.



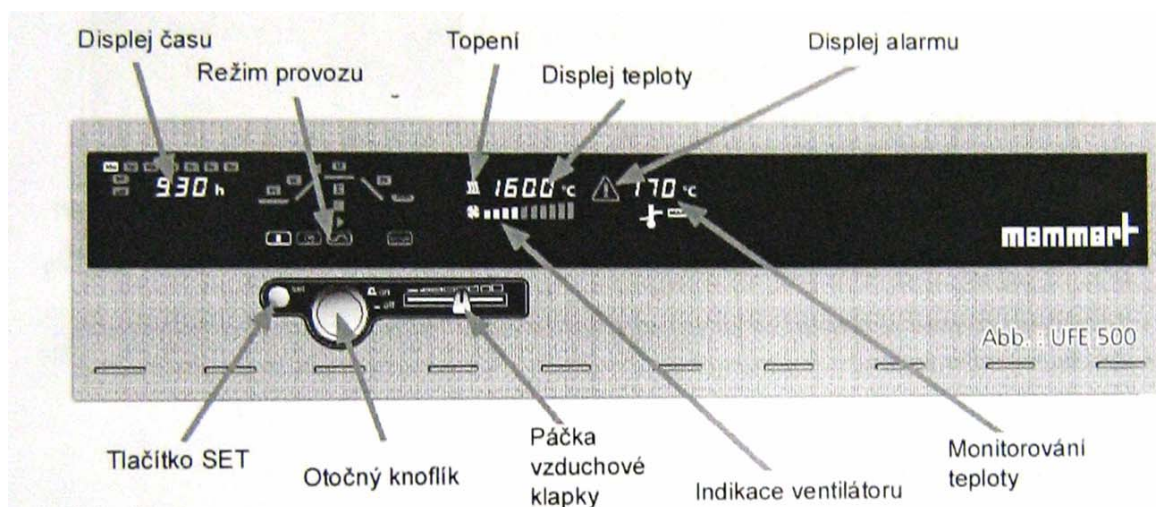
Obr. 32. Celkové zapojení senzoru a všech potřebných součástí

Senzor FS2T byl vložen do již vyrobeného kanálu (viz. kap. 5.4). Pro zajištění těsnosti senzoru v polystyrénové drážce byl použit silikon, který zamezil úniku tepla. Následovalo upnutí do laboratorního stojanu a vložení senzoru do vyrobeného konektoru.



Obr. 33. Vložení senzoru do měřícího kanálu.

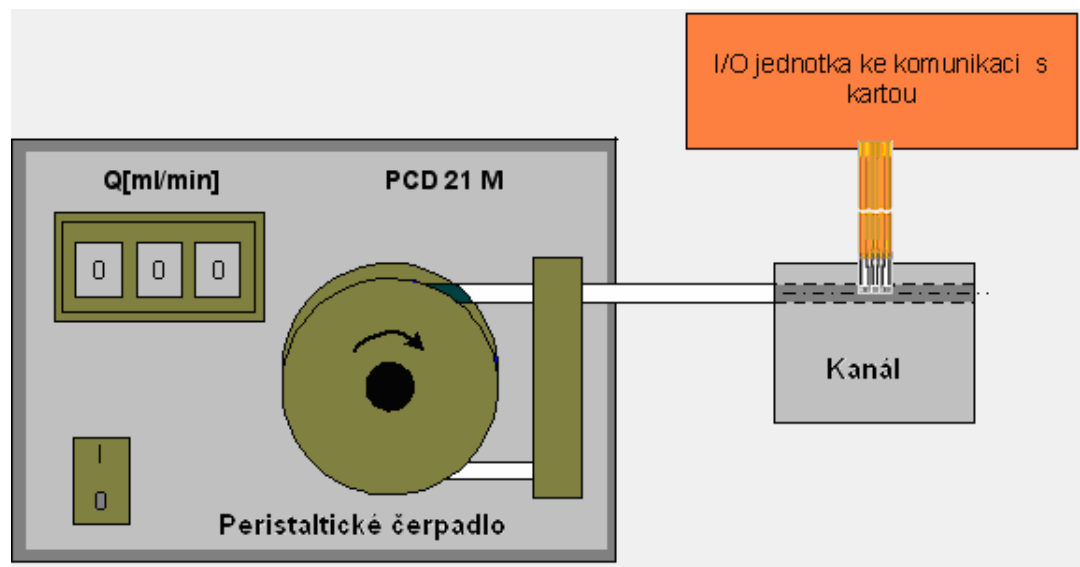
Přívod plynu zajišťuje peristaltické čerpadlo, které pomocí silikonových hadiček dopravuje plyn přímo do kanálu. Celé toto zapojení bylo umístěno do sušárny. K tomuto účelu byla zakoupena elektronicky regulovatelná sušárna od firmy Memmert. Teplota v sušárně se nastavuje velice jednoduše. Zapnutí sušárny se provede stlačením *Otočného knoflíku* na panelu (viz. Obr. 34). Nastavení teploty se provádí stisknutím tlačítka *Set* a *Otočným knoflíkem* se nastaví daná teplota.



Obr. 34. Panel sušárny

Elektronické zapojení bylo řešeno již v předešlé diplomové práci na desce plošného spoje, pouze vyvažovací rezistor R1 byl mimo desku plošného spoje. Vzhledem k uvažování pulzního topení byl do obvodu přidán spínací tranzistor, který je spolu s vyvažovacím odporem umístěn mimo desku plošného spoje a to na nepájivém poli.

Na obr. 33 je zobrazeno souhrnné zapojení měřicího systému. Ke komunikaci průtokoměru s počítačem byla použita karta Advantech PCI 1716. Pro sledování a monitorování průtoku slouží vizualizační program vytvořený v prostředí ControlWeb.



Obr. 35. Průtokoměr a potřebné komponenty

Po tomto sestavení průtokoměru nastala fáze měření.

6 MĚŘENÍ

V rámci této DP byla provedena metrologická měření použitého senzoru i navrženého průtokoměru. Byly řešeny tyto body:

- Určení statické a dynamické charakteristiky snímače (senzoru) průtoků plynu
- Určení statické a dynamické charakteristiky navrženého průtokoměru
- Ověření nezávislosti přesnosti měření na teplotě proudícího plynu
- Pulzní topení

Měření byla prováděna pro proudící vzduch. Při jednotlivých měřeních se nastavovala teplota okolního vzduchu pomocí zakoupené sušárny. U peristaltického čerpadla PCD 21M, které zajišťovalo proud vzduchu, byly pro měření průtoků použity silikonové hadičky s označením CV2 a CV4. Průtok plynu bylo možné nastavit v rozsahu od 0,035 *ml/min* do 12 *ml/min*.

Dále při měření byly použity tyto měřicí a pomocné přístroje:

1. Napájecí zdroj $\pm 10V$ AVON SZ 489, výr. č. A/ 10620
2. Regulovatelný napájecí zdroj BK 127, výr. č. 516504
3. Peristaltické čerpadlo PCD 21M, výr. č. 402/01
4. PS s OZ OP298
5. PT100 s převodníkem RU-1P-DC, výr. č. L5/13
6. Svorkovnice ke kartě včetně karty Advantech PCI 1716
7. Vytvořené prostředí v aplikaci CW
8. Sestavený průtokoměr se senzorem

Na obr.36 je zdokumentováno reálné pracoviště umístěné na učebně C 307 ústavu U5, kde byla prováděna veškerá měření.



Obr. 36. Reálné pracoviště

Pro potřebu zkvalitnění měření teploty proudícího plynu bylo nutné použít vhodný filtr. Byl vytvořen softwarový filtr *průměrový*, který funguje na principu n měření dané veličiny v jediné periodě vzorkování. Za filtrovanou hodnotu se pak bere průměr z těchto n naměřených hodnot dle následujícího vzorce:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (30)$$

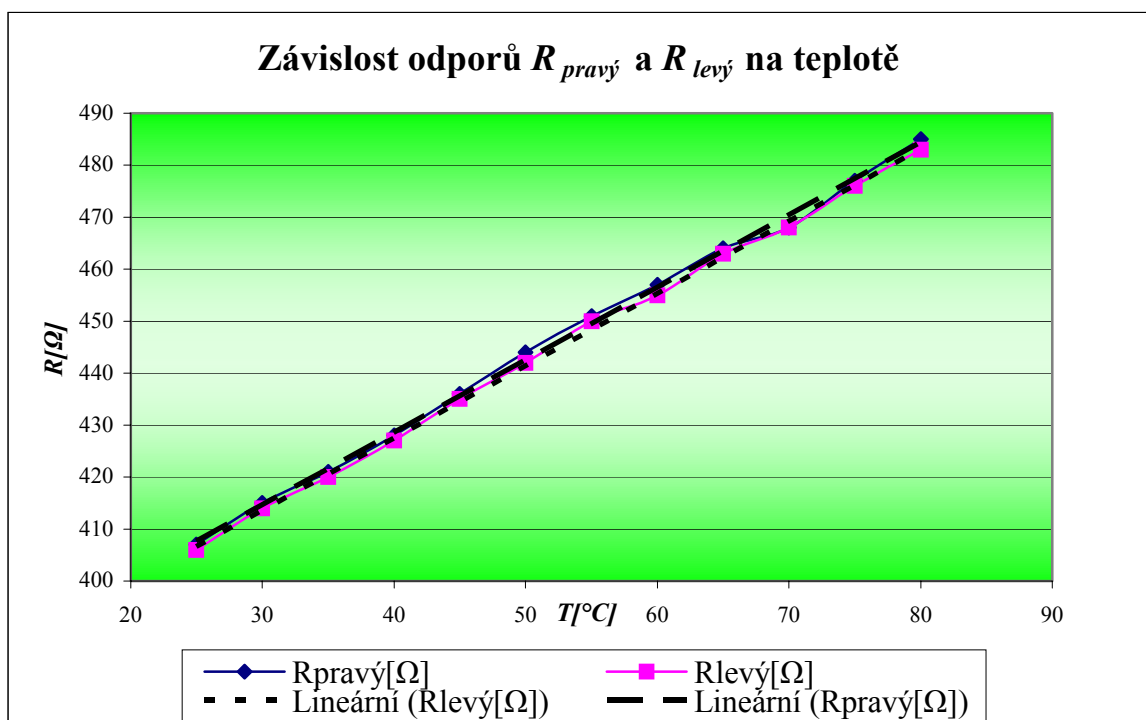
Bylo přečteno 10 měřených hodnot z kanálu o periodě vzorkování 0,2 s, z těchto hodnot udělán průměr a poté hodnoty zobrazeny každé 2 s v přístroji. Tento filtr je také nazýván *klouzavým průměrem*.

6.1 Charakteristiky senzoru

6.1.1 Statická charakteristika senzoru

Měřením statických charakteristik se zabývalo již mnoho diplomových prací, proto postup měření neuvádím a odkazuji na jinou literaturu. [10]

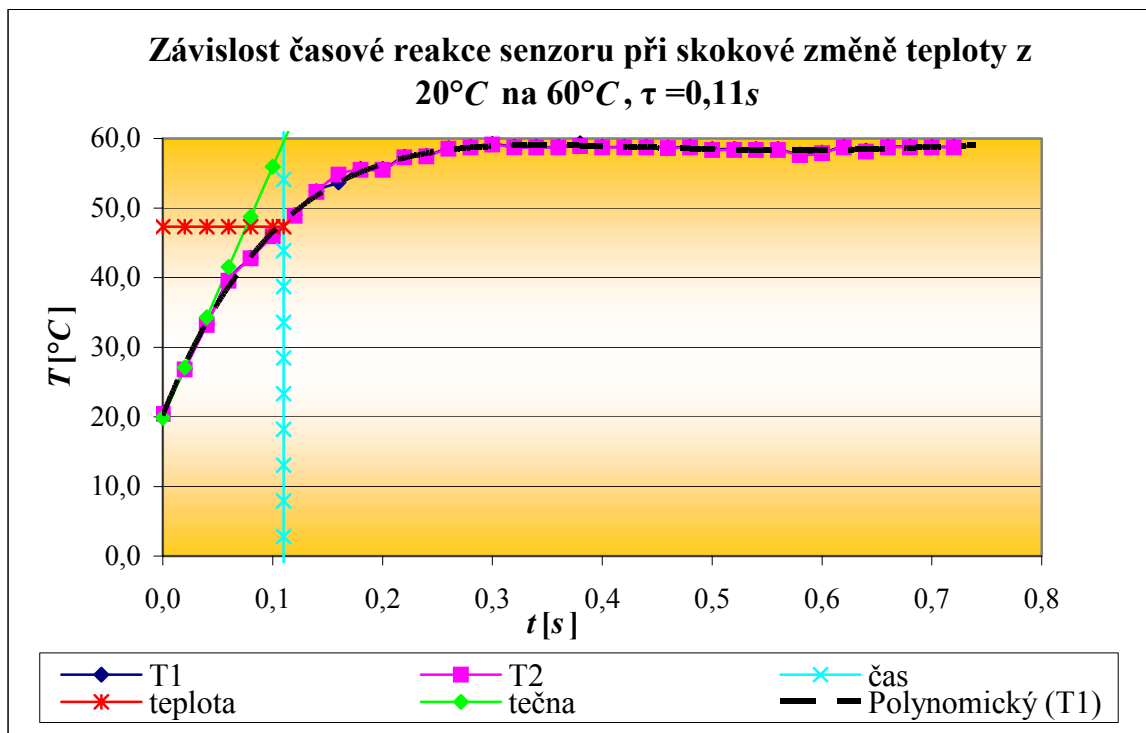
Statická charakteristika senzoru, viz. graf 1, představuje změny pravého $R_{pravý}$ a levého $R_{levý}$ odporu v závislosti na teplotě v ustáleném stavu.



Graf 1. Závislost změny pravého a levého odporu na teplotě

6.1.2 Dynamická charakteristika senzoru

Měření dynamických charakteristik se provádí principem měření odezvy na skok žadané veličiny. Přechodová charakteristika (viz. graf 2) je funkcí teplot T_1 a T_2 v závislosti na čase při skokové změně teploty z $20^{\circ}C$ na $60^{\circ}C$.



Graf 2. Závislost teplot T_1 a T_2 na čase při skokové změně teploty z 20°C na 60 °C

Z grafu vyplývá, že časová konstanta senzoru je $\tau = 0,11s$.

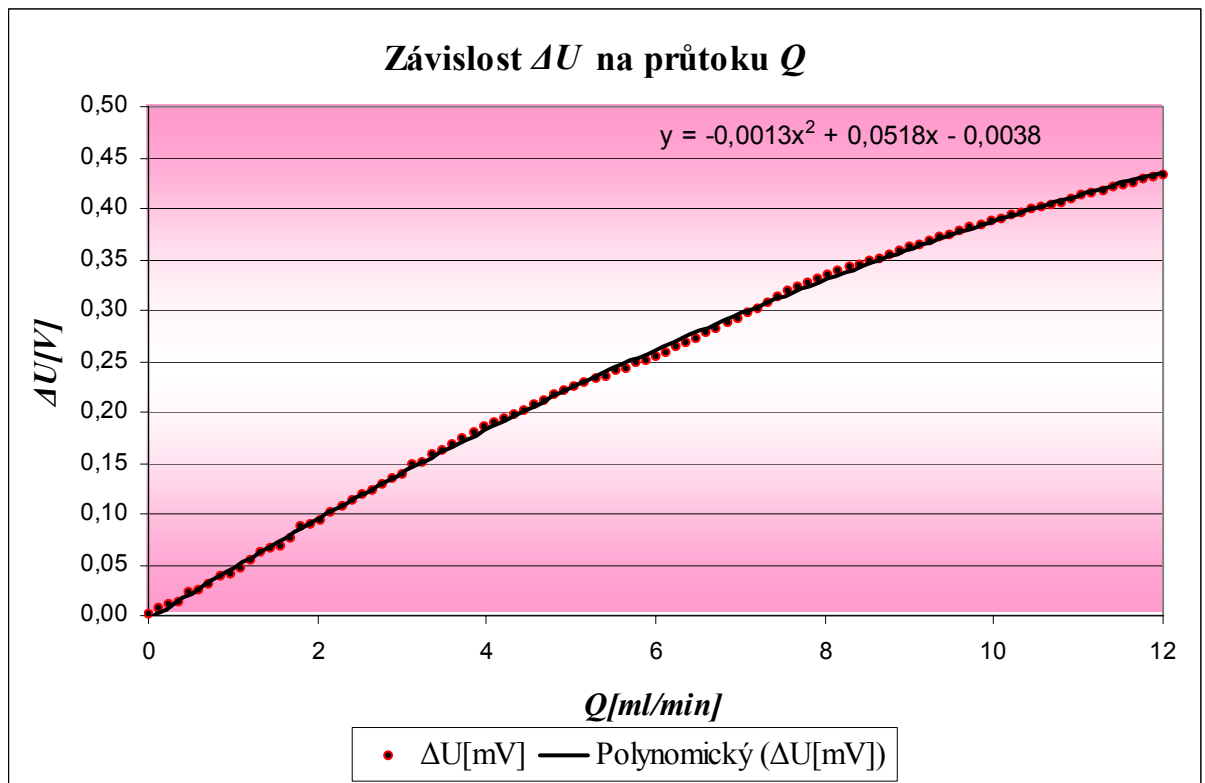
Naměřené hodnoty statických a dynamických charakteristik senzoru jsou uvedeny v příloze (viz. příloha P III).

6.2 Charakteristiky průtokoměru

6.2.1 Statické charakteristiky realizovaného průtokoměru plynu

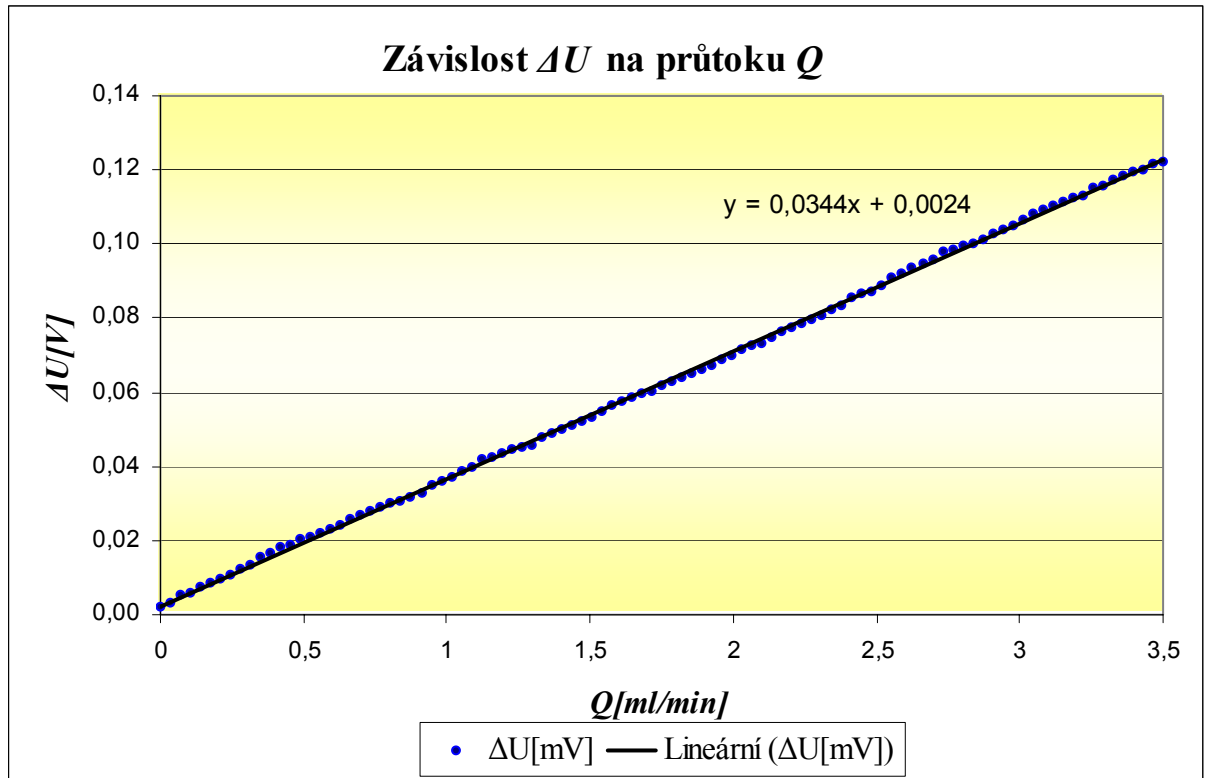
Statická charakteristika představuje závislost mezi výstupním napětím na měřicím můstku ΔU a objemovým průtokem Q v ustáleném stavu. Napětí na topném odporu je 1,16V. Naměřené hodnoty statických charakteristik průtokoměru, které byly změřeny za podmínek popsanych u grafů 3 až 6, jsou uvedeny v příloze (viz. příloha P IV).

V grafu 3 jsou zaznamenány hodnoty závislosti ΔU na průtoku Q . Toto měření bylo prováděno při teplotě 23,5 °C a při použití hadičky CV4.



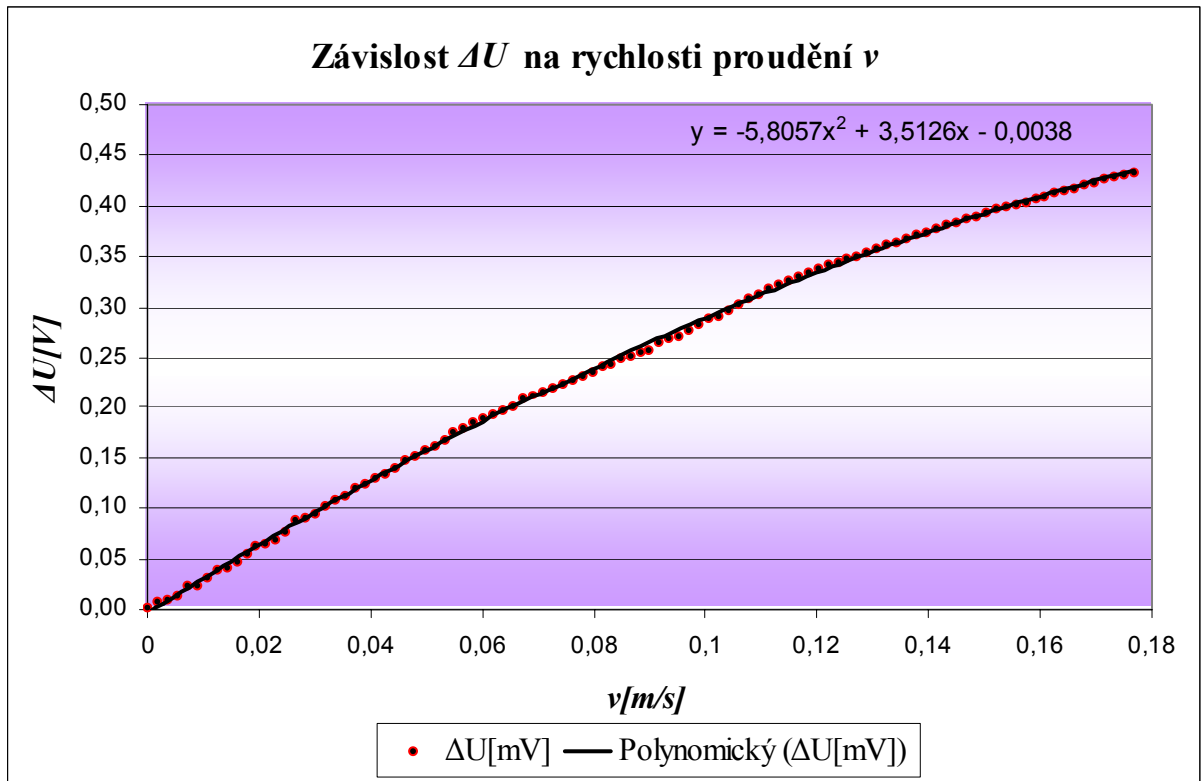
Graf 3. Závislost ΔU na průtoku Q při použití hadičky CV4

V grafu 4 jsou zaznamenány hodnoty naměřené při teplotě 24,5 °C a při použití hadičky CV2. Z grafu vyplývá, že naměřené hodnoty téměř kopírují lineární tvar křivky závislosti ΔU na průtoku Q .



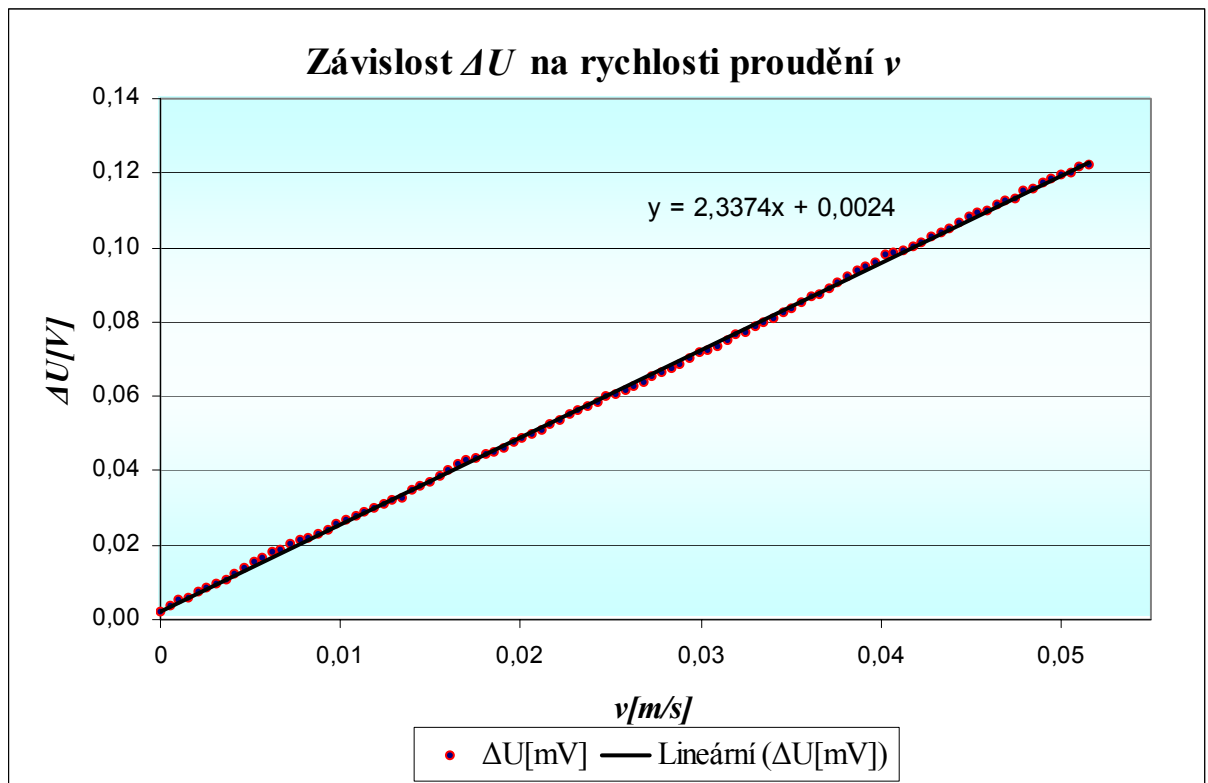
Graf 4. Závislost ΔU na průtoku Q při použití hadičky CV2

Závislost ΔU na rychlosti proudění v zachycuje graf 5. Měření bylo provedeno za následujících podmínek: okolní teplota 23,5 °C a použití hadičky CV4.



Graf 5. Závislost ΔU na rychlosti proudění v při použití hadičky CV4

Naměřené hodnoty závislosti ΔU na rychlosti proudění v při použití hadičky CV2 vykazují téměř lineární charakter (viz. Graf 6.). Při měření okolní teplota dosahovala 24,5 °C.

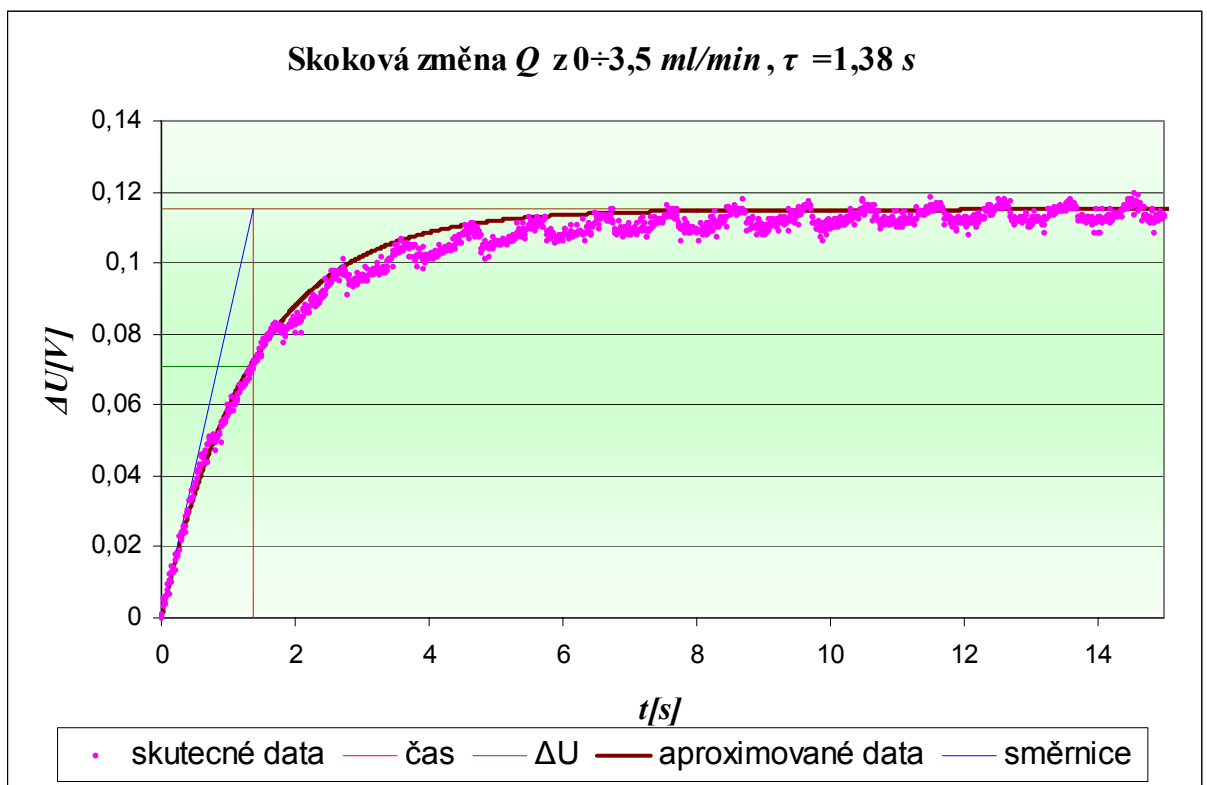


Graf 6. Závislost ΔU na rychlosti proudění v při použití hadičky CV2

6.2.2 Dynamické charakteristiky realizovaného průtokoměru plynu

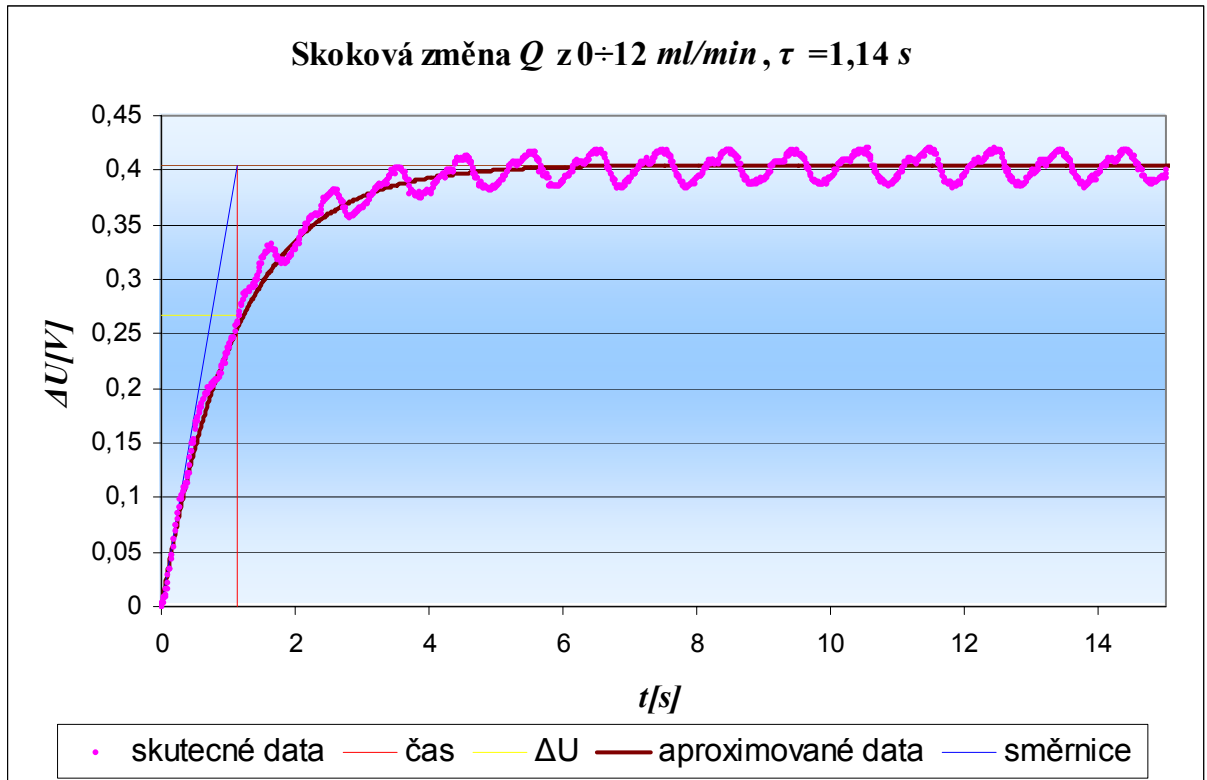
Naměřené hodnoty dynamických charakteristik průtokoměru, které byly změřeny za podmínek popsaných u grafů 7 až 8, nejsou uvedeny v příloze z důvodu velkého datového objemu. Naměřená data jsou proto součástí CD přiloženého k této práci.

V grafu 7 je zobrazena dynamická charakteristika závislosti mezi výstupním napětím na měřicím můstku ΔU a časem při skokové změně Q z 0 na 3,5 ml/min. Napětí na topném odporu je 1,16V. Jsou zde zaznamenány hodnoty naměřené při teplotě 23 °C a při použití hadičky CV2.



Graf 7. Dynamická charakteristika při skokové změně průtoku z 0 na 3,5 ml/min při použití hadičky CV2

Dynamická charakteristika závislosti mezi výstupním napětím na měřicím můstku ΔU a časem při skokové změně Q z 0 na 12 ml/min je zobrazena v grafu 8. Tato měření probíhala za použití hadičky CV4 a při okolní teplotě 23 °C.



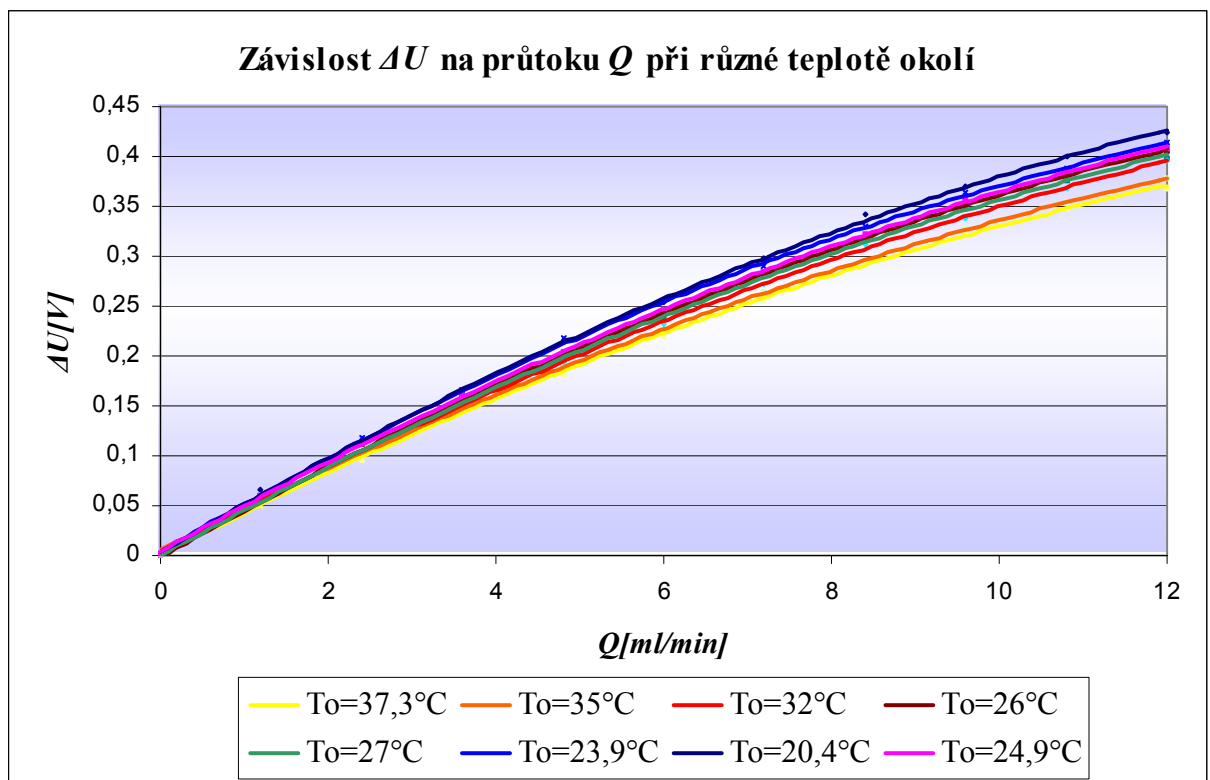
Graf 8. Dynamická charakteristika při skokové změně průtoku z 0 na 12 ml/min při použití hadičky CV4

Z grafu 7, 8 je patrné, že hodnoty ΔU kolísají v rozmezí $\pm 0,01$ mV. To je dáno rozlišovací schopností měřicí karty a peristaltickým čerpadlem, které nedávkuje spojitě.

6.3 Určení nezávislosti měření proudícího plynu na teplotě

6.3.1 Naměřené charakteristiky

V grafu 9 jsou zaznamenány hodnoty ΔU v závislosti na průtoku Q naměřené při různých teplotách okolí. Tyto hodnoty byly naměřeny při použití hadičky CV4 a při napětí na topném odporu 1,16V.



Graf 9. Závislost ΔU na průtoku při různých teplotách okolí

Naměřené hodnoty ΔU v tomto grafu začínají ve stejném bodě tj. při $Q = 0 \text{ ml/min}$ a postupně při větším objemovém průtoku Q se rozcházejí. Proto bylo nutné najít takový přepočtový algoritmus, aby umožnil posun těchto závislostí na stejnou hodnotu při různých teplotách okolí.

Všechny hodnoty ΔU v závislosti na průtoku Q při různých teplotách okolí jsou uvedeny v příloze P V.

Pro výpočet posunutí křivek v grafu 9 a **určení nezávislosti měření průtoku na okolní teplotě** je dán následující vztah:

$$m * T * a = p \quad (31)$$

Kde :

m – je hodnota ΔU na měřicím můstku při dané teplotě

p – je referenční hodnota ΔU na měřicím můstku

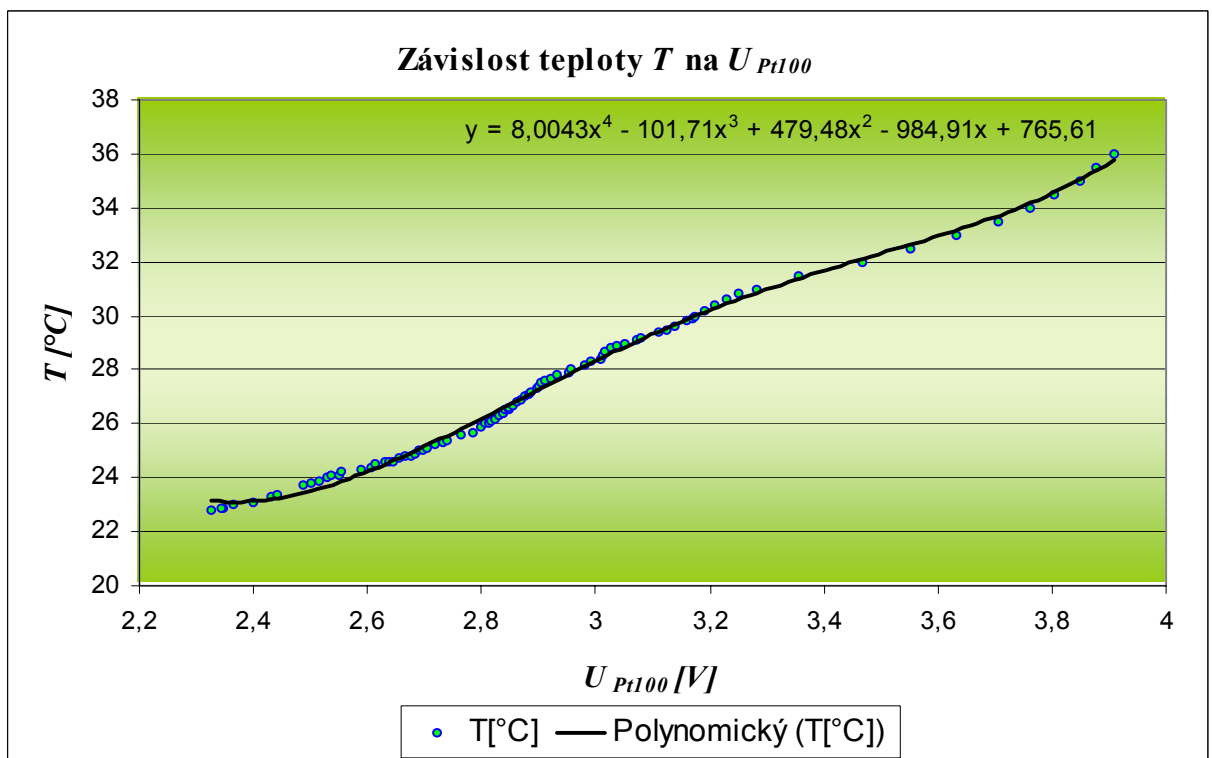
T – je teplota okolí

a – konstanta

Z rovnice (31) si vyjádříme a

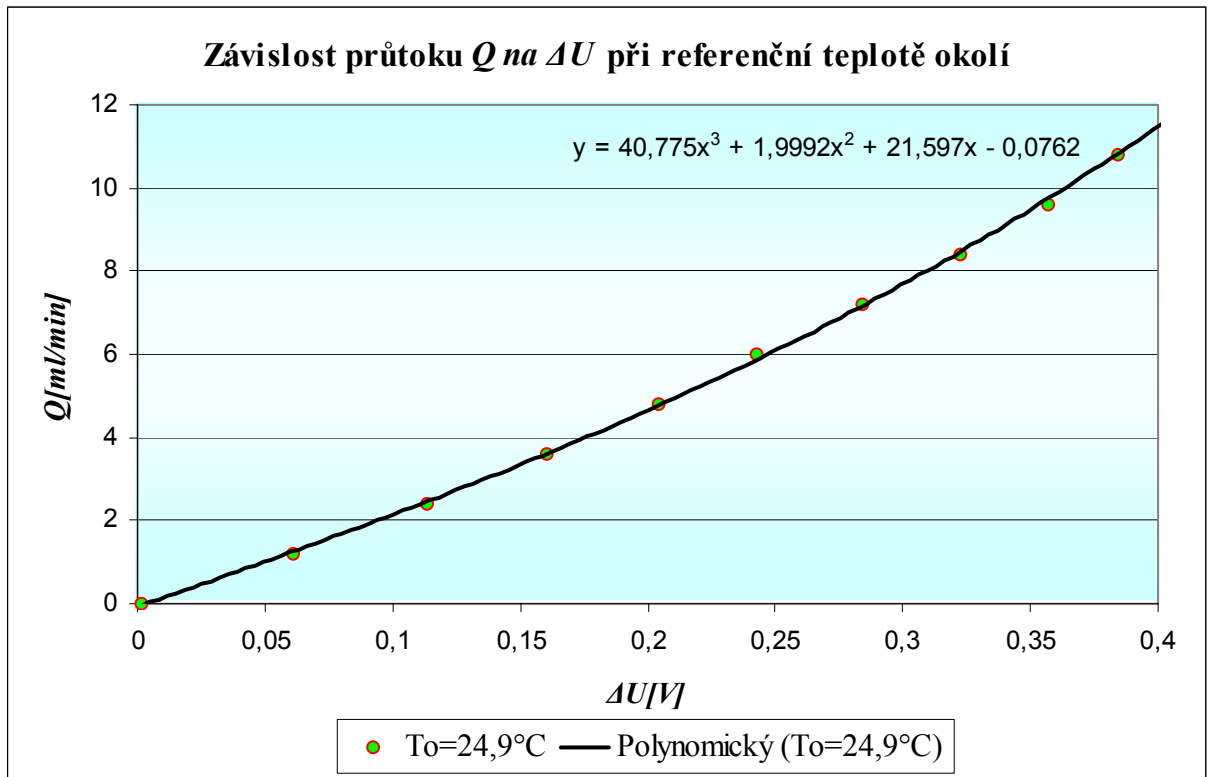
$$a = \frac{p}{m * T} \quad (32)$$

Pro tento účel bylo nutné zanést do aplikace skutečnou hodnotu teploty okolí. Z odporového teploměru Pt100 byla pomocí napěťového převodníku RU-IP brána hodnota napětí přímo do aplikace, kde byla převedena na teplotu. Tuto hodnotu již bylo možné použít při výpočtu. Závislost teploty na napětí U_{Pt100} je vynesena v grafu 10.



Graf 10. Závislost teploty T na napětí převodníku RU-IP

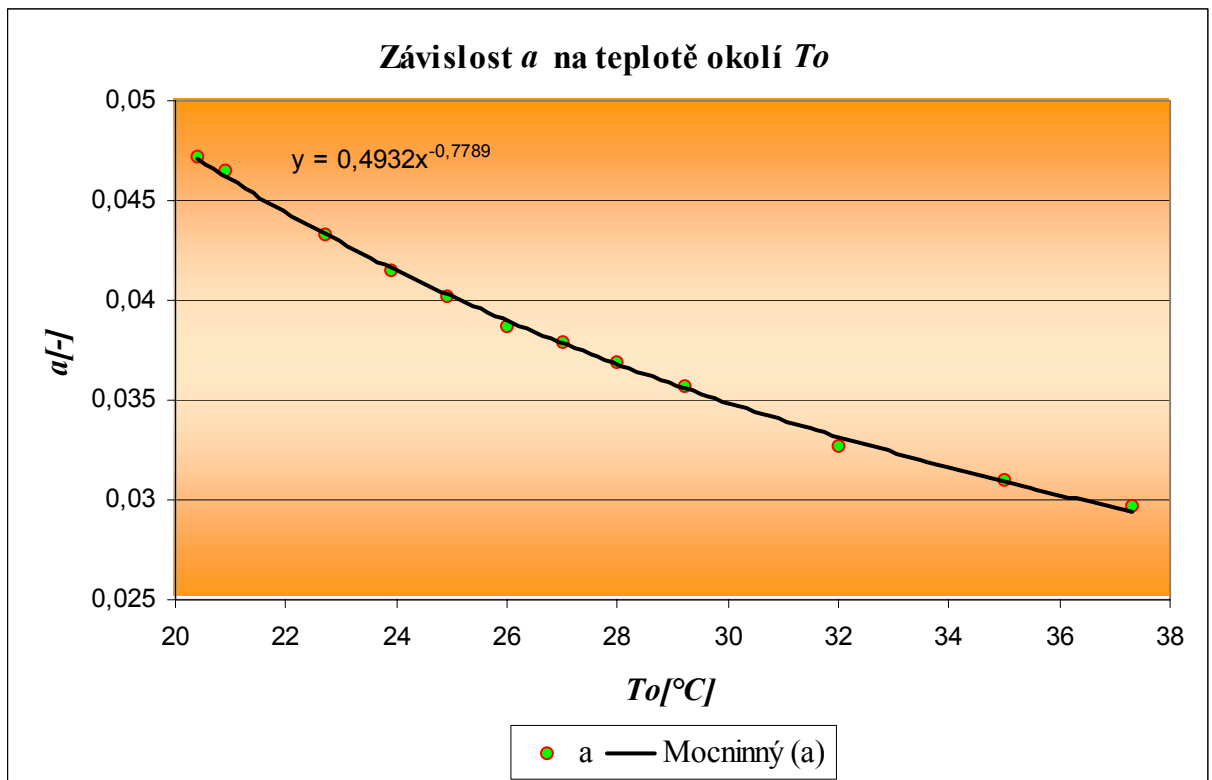
Dále bylo nutné zvolit referenční teplotu ke které se budou provádět veškeré výpočty. V tomto případě byla zvolena referenční teplota $T_0 = 24,9^\circ\text{C}$.



Graf 11. Závislost průtoku Q na ΔU při referenční teplotě.

Po zvolení referenční hodnoty již následovaly výpočty přepočtového koeficientu a podle rovnice (32). Tento koeficient je nutný pro přepočet mezi skutečnou teplotou okolí a hodnotou referenční.

V grafu 12 je vynesena závislost a na teplotě okolí a je proložena patřičnou regresí.



Graf 12. Závislost a na teplotě okolí

V tomto případě se hodnoty a vypočítají dle následujícího vzorce:

$$a = \frac{0,4932}{T^{0,7789}} \quad (33)$$

Hodnota a představuje koeficient posuvu mezi křivkami zobrazenými v grafu 9. Tato hodnota je poté dosazována do vzorce (31).

Výpočtem získáme referenční hodnotu m , která se bude při určitém průtoku Q a při určité teplotě okolí pohybovat po naměřené referenční křivce (viz. graf 11). Naměřené hodnoty závislostí popsanych u grafů 10 až 12, jsou uvedeny v příloze (viz. příloha P V).

Při zadání zmíněných podmínek do aplikace jsou pak v rámci měření získány vždy hodnoty ΔU při určité okolní teplotě, ovšem zobrazovaný průtok v aplikaci je již na okolní teplotě nezávislý.

6.4 Pulzní topení

Pro měření průtoku plynu pomocí senzoru FS2/FS2T bylo využito spojitě topení. Tedy vyhřívací element nacházející se mezi odporovými teploměry $R_{levý}$ a $R_{pravý}$ na keramické podložce, trvale připojený ke zdroji stejnosměrného napětí. Výsledky měření průtoku plynu jsou uvedeny v předchozím textu.

V rámci diplomové práce byla zvažována a ověřována i možnost využití pulzního topení, tedy vyhřívání elementu pomocí zdroje stejnosměrného napětí. K tomuto účelu byl v obvodu zapojen tranzistor, který zprostředkoval pulzní spínání zdroje. Byla tak studována možnost, zda by šlo senzor FS2/FS2T použít ve funkci teplotně – značkovacího průtokoměru.

Změna teploty v proudícím plynu byla měřena pomocí odporového teploměru, který je součástí senzoru FS2/FS2T. Při měření byl využit ovladač pro rychlé děje, přičemž délka pulsů pro topný element byla ověřována v rozsahu od 100 ms do 3 s. Měřením se zjistilo, že metodou pulzního topení nelze naměřit pro tento senzor výsledky, které by bylo možno použít pro vyhodnocení průtoku plynu. Senzor není vhodný pro pulzní topení z důvodu umístění senzoru teploty a vyhřívacího elementu na společné keramické základně. Při tepelném impulsu tak dochází k téměř okamžitému ohřevu senzoru teploty což je nežádoucí.

Dále lze předpokládat, že časová konstanta použitého senzoru je poměrně velká v porovnání s rychlostí dějů spojených s generováním tepelných pulsů a jejich šířením v prostředí. Od měření průtoku senzorem FS2/FS2T bylo tedy v dalším kroku upuštěno. Pro ověření funkce pulzního topení byl vytvořen zkušební senzor viz. kapitola 7.

7 PRŮTOKOVÝ SENZOR NAVRŽENÝ PRO PULZNÍ TOPENÍ

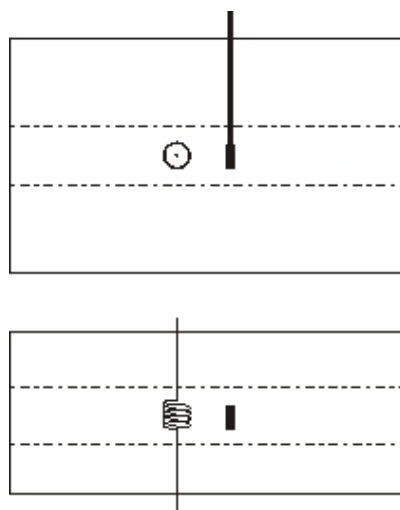
7.1 Popis průtokoměru

Základní princip měření je založen, na číslcovém vyhodnocování závislosti rychlosti šíření tepelných vln na průtoku. Při konstrukci tohoto průtokoměru je do měřicího kanálu umístěno vyhřívací tělísko. Proudící plyn se v blízkém okolí vlivem přestupu tepla z tělíska do plynu zahřívá a takto zahřátý plyn je prouděním unášen k teplotnímu snímači, který je umístěn v definované vzdálenosti za vyhřívacím tělískem. Teplotní snímač reaguje na změnu teploty okolí, změnou svého vnitřního elektrického odporu. Jako senzor měřící změnu teploty proudícího plynu v čase byl použit termistor typu NTC.

7.2 Návrh kanálu

Pro realizaci průtokoměru byl použit tvrzený polystyren, protože při provádění testů se jevil jako nejvhodnější. (viz. kap. 5.4)

Vlastní realizace průtokoměru byla provedena v polystyrenu tvaru kostky o rozměrech 22 x 20 x 14. V tomto materiálu byl vytvořen měřicí kanál o průměru 4mm. Kolmo na měřicí kanál byl vyvrtán otvor potřebný pro vložení topné spirálky. Na vrchní straně kanálu byly pomocí ostrého nožiku vytvořeny drážky, do kterých se následně vkládal termistor. Drážky byly zhotoveny ve vzdálenosti 1, 2 a 3mm od topné spirálky.



Obr. 37. Náskres kanálu

Termistor jako teplotní senzor

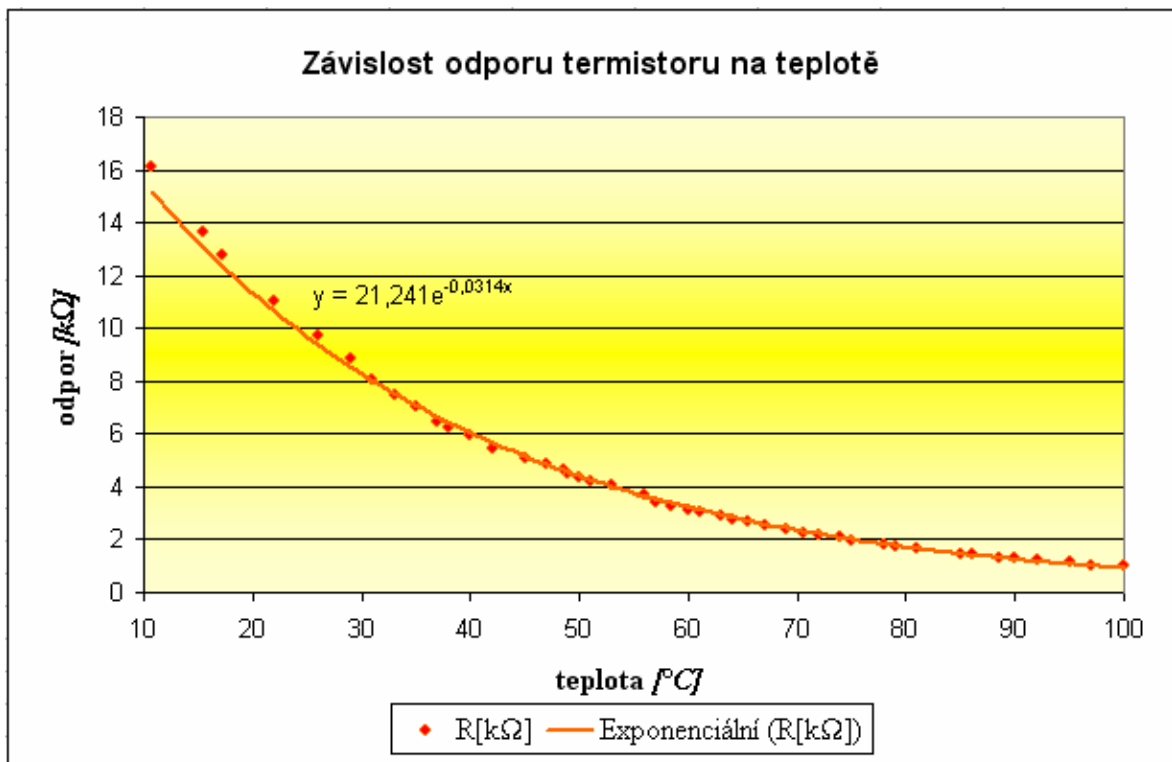
Termistor je polovodičová součástka, jejíž charakteristickou vlastností je závislost elektrického odporu na vlastní teplotě. Základním materiálem pro výrobu termistorů jsou oxidy kovů, z nichž nejčastěji se používají oxidy niklu, manganu, kobaltu, železa a jiné.[5].

- Termistor typu PTC, přímo úměrná závislost teploty a elektrického odporu
- Termistor typu NTC, nepřímo úměrná závislost teploty a elektrického odporu.

Pro konstrukci měřicí sondy mikroprůtoku plynu byl vybrán termistor typu NTC, pro větší výhodnost nepřímé úměry závislosti teploty a elektrického odporu.

Termistorový snímač byl také vybrán z důvodu jeho citlivosti v oblasti běžných teplot, v okolí 20°C, v okolí této teploty je změna vnitřního odporu nejméně desetkrát větší u termistoru než například u platinového teploměru.

Další důvod pro volbu termistoru jako teplotního snímače byly jeho malé rozměry. Nevýhodou při použití termistoru jako teploměru je především jeho značná nelinearita závislosti teploty a elektrického odporu (viz. graf.13).



Graf 13. Závislost odporu termistoru na teplotě

7.3 Sestavení průtokoměru

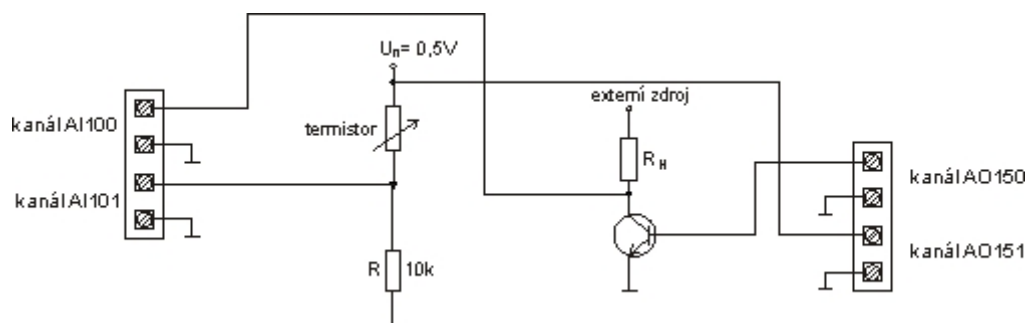
7.3.1 Postup při sestavení průtokoměru

Při sestavení průtokoměru byl použit navržený kanál, do kterého byla vsazena topná spirálka. Topná spirálka je vytvořena z odporového drátu o průměru 0,2mm. Spirálka byla zhotovena pomocí vrtáčku o průměru 1,2mm a má 4 závity. Topná spirálka je v polystyrenu pevně upevněna proti uvolnění a zalepena pomocí lepidla. Na horní straně kanálu byl do příslušné drážky vložen termistor.



Obr. 38. Reálné zapojení průtokoměru

Termistor a topné těleso byly zapojeny do měřicího obvodu dle následujícího zapojení.



Obr. 39. Celkové zapojení senzoru a všech potřebných součástí

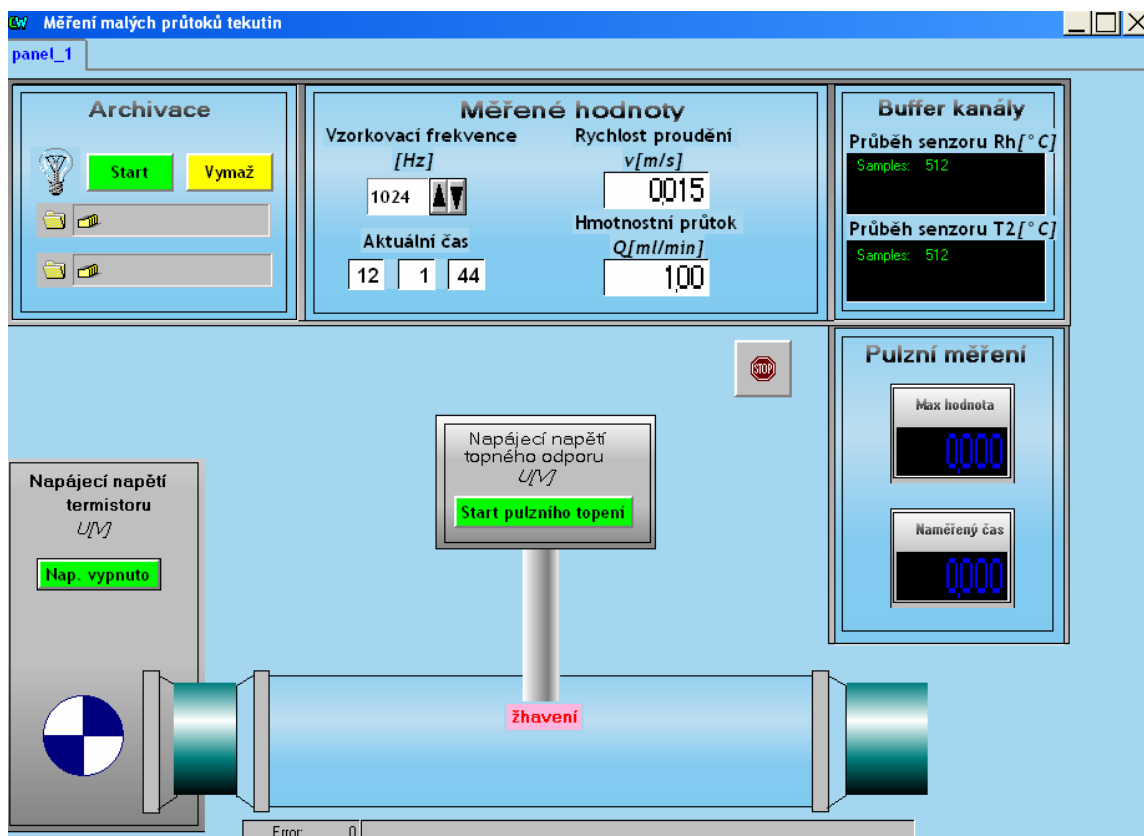
Jak se vidět ze schématu, je obvod termistoru napájen malým napětím. Napětí je voleno tak, aby proud procházející termistorem nepřekročil mez při které dojde k vlastnímu vnitřnímu ohřevu. Proud termistorem byl v tomto případě $25\mu\text{A}$. Průchozí proud, při kterém nedochází k ohřevu je odlišný pro každý typ termistoru.

Pulzní topení je zajištěno spínáním stejnosměrného zdroje pomocí výkonového tranzistoru. Pro spínání je nutné použít výkonový tranzistor z důvodu velkého protékajícího proudu v obvodu tranzistoru. Proud nutný k ohřevu topné spirálky se pohybuje v řádu stovek mA. Odběr topného tělíska závisí na jeho elektrickém odporu (resp. tloušťce topného drátu a jeho délce). Při tomto měření byl odběr topného elementu 400mA při napájení 1V. Celé elektronické zapojení (viz. obr.39.) bylo pro zkušební účely realizováno na nepájivém poli.

7.3.2 Princip činnosti průtokoměru a zpracování dat

V klidovém stavu měří termistor teplotu okolního vzduchu. Při pulzním zatopení se teplo od topného tělíska šíří samovolně prostorem a částečně ohřívá měřicí termistor. Ohřevem termistoru dojde ke snížení jeho odporu a díky tomu začne procházet obvodem termistoru větší proud. Tento proud změní poměr úbytků napětí mezi termistorem a sériově připojeným rezistorem. Na rezistoru je poté měřitelná změna napětí. Tato změna je snímána měřicí kartou a to vstupem AI101. Tento vstup společně se snímáním topného pulzu na vstupu AI100 je vyhodnocován programovým prostředím CW. Jestliže začne proudit průtokoměrem vzduch, dojde k rychlejšímu šíření vyzářeného tepla a teplotní vlna změní svůj tvar. Přívod vzduchu zajišťuje peristaltické čerpadlo, které pomocí silikonových hadiček dopravuje plyn přímo do kanálu.

Program vytvořený v prostředí CW zajišťuje pomocí měřicí karty Advantech PCI 1716 ovládání napájení obvodu termistoru a dále spínání stejnosměrného zdroje. Ovládání se provádí přes analogové výstupy A0150 a A0151. Změřená data jsou programově vyhodnocena a je zobrazeno maximum tepelné vlny a čas ve kterém maximum nastalo. Pro kontrolu funkce průtokoměru jsou v horní části programu zobrazeny průběhy na buffer kanálech. Všechny data z buffer kanálů jsou ukládány archivátorem v souboru buffery.xls. Tento soubor je klasická databáze dat, která lze otevřít např. programem Excel.



Obr. 40. Ukázka programového prostředí.

Vlastní spuštění archivace a snímání jednoho průběhu pulzu se provádí tlačítkem Start. Délka pulzu je volitelná programově v textovém režimu programu. Pro správnou funkci průtokoměru musí být v programu spuštěno napájení termistoru a musí být zvolena vhodná perioda vzorkování. V tomto případě byla použita vzorkovací frekvence 128 vzorků za sekundů pro oba měřicí kanály. Z toho vyplývá že vzorkování pro jeden kanál je poloviční.

7.4 Měření na vytvořeném průtokoměru.

V rámci této DP bylo provedeno metrologické měření navrženého průtokoměru.

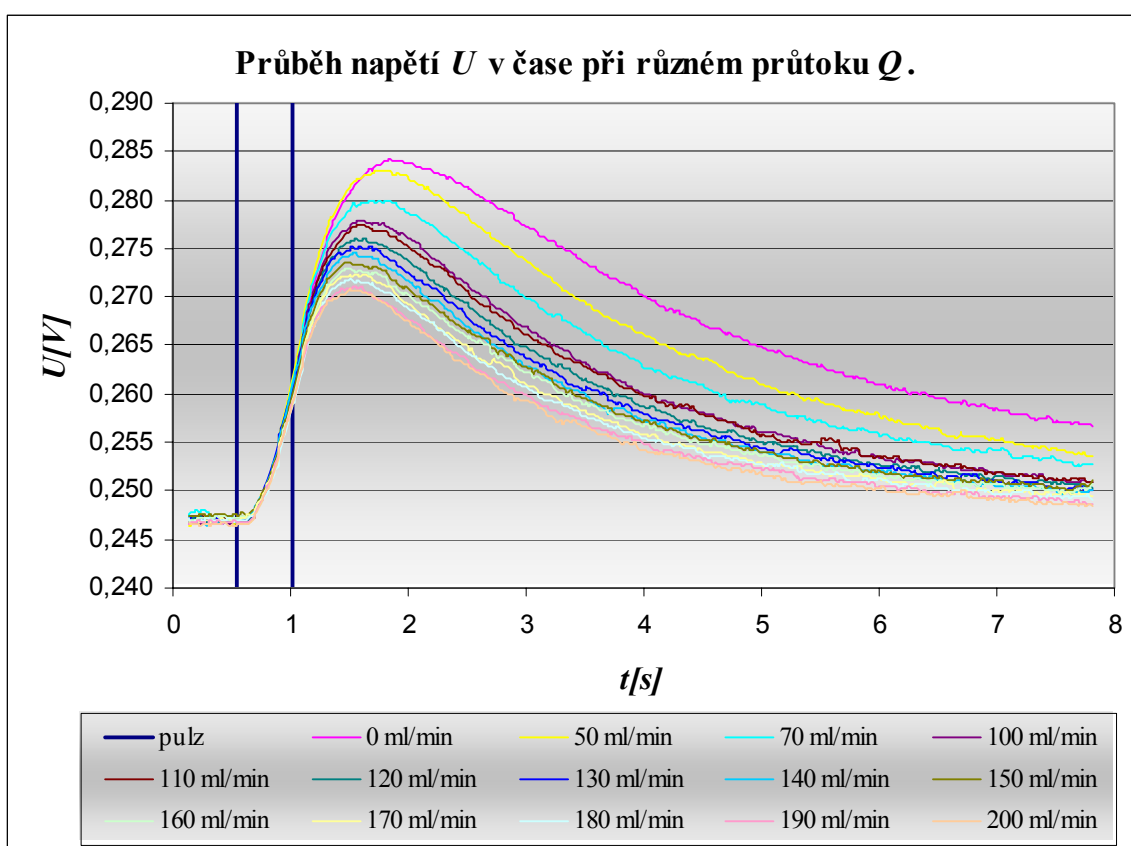
Měření byla prováděna pro proudící vzduch. Při počátečních pokusech bylo používáno peristaltické čerpadlo PCD 21M s nastavitelným rozsahem průtoku od 0,035ml/min do 12ml, které zajišťovalo proud vzduchu. Měřením bylo zjištěno, že je pro tento způsob měření nedostatečné a proto bylo zapůjčeno výkonnější čerpadlo s označením PCD 61V5 s nastavitelným rozsahem průtoku od 2ml/min do 200ml.

Dále při měření byly použity tyto měřicí a pomocné přístroje:

1. Regulovatelný napájecí zdroj BK 127, výr. č. 516504
2. Svorkovnice ke kartě včetně karty Advantech PCI 1716
3. Vytvořené prostředí v aplikaci CW
4. Sestavený průtokoměr se senzorem

7.4.1 Průběhy na realizovaném průtokoměru

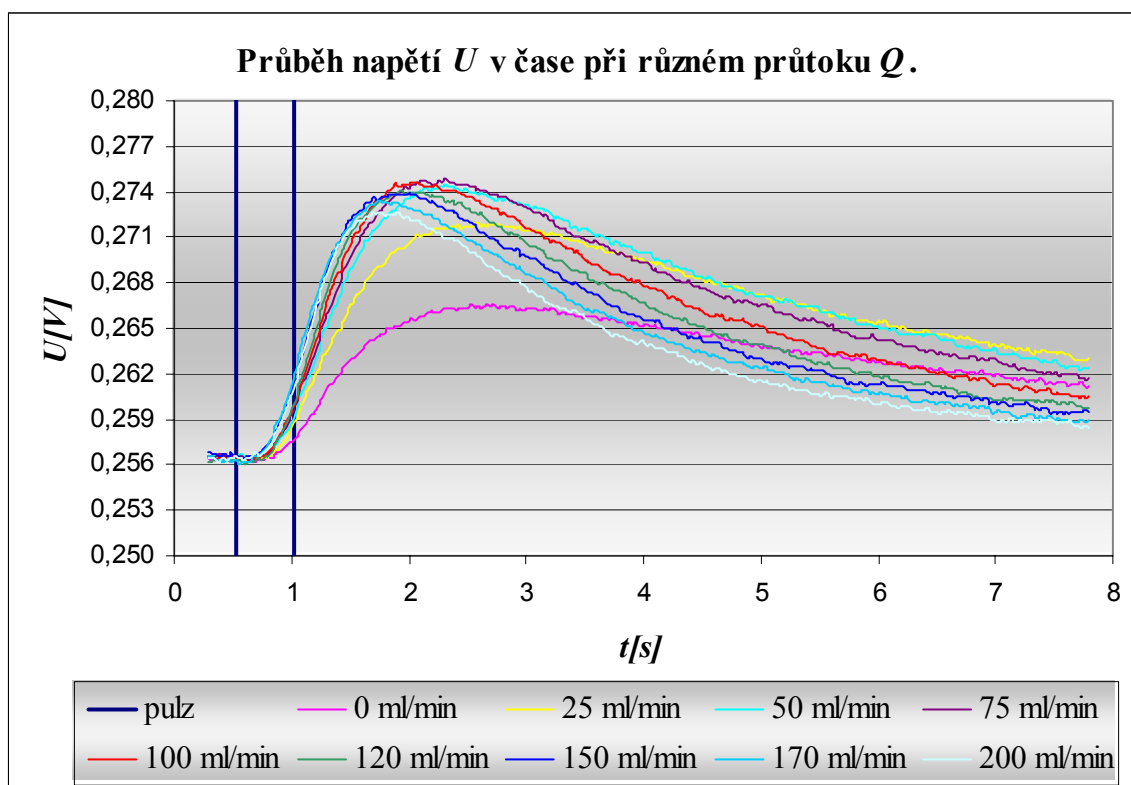
Průběh chování tepelné vlny při různém průtoku vzduchu přes měřicí kanál je uveden v grafu 14. Naměřené průběhy popsané v grafu jsou změřeny při pulzním napětí velikosti 1,16V a délce pulzu 0,5s. Vzdálenost snímače teploty (termistoru) je v tomto případě 1mm od topného tělesa.



Graf 14. Průběh napětí v čase při různém průtoku Q a vzdálenosti senzoru teploty 1mm

V případě senzoru teploty vzdáleného 1mm od topného elementu vzniká maximální vlna při nulovém průtoku vzduchu. Při zvyšování průtočného množství vzduchu se snižuje maximální hodnota vlny a zmenšuje se čas, ve kterém maximum nastane (viz.graf 14.).

Při změně vzdálenosti snímače teploty na 2mm od topného elementu byl průběh tepelné vlny následující. (viz. graf 15.)



Graf 15. Průběh napětí v čase při různém průtoku Q a vzdálenosti senzoru teploty 2mm

V případě senzoru teploty vzdáleného 2mm od topného elementu dostaneme pro nulový průběh vlnu s nejmenší hodnotou maxima. Je to způsobeno tím, že na rozdíl od předchozího případu vzniklé teplo na topném elementu v klidovém stavu minimálně působí na senzor teploty. K razantnímu zvýšení teploty na senzoru dochází až při unášení tepla z topného tělíska proudem procházejícího vzduchu. Tak jako v předchozím případě se při zvyšování průtoku snižuje čas při kterém maximum vlny nastane.(viz.graf 15.).

Bylo prováděno také měření pro vzdálenost teplotního senzoru 3mm od topného tělíska. Při tomto měření bylo zjištěno, že senzor již na změnu teploty nereaguje.

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Byl sestrojen průtokoměr s využitím senzoru FS2T a kanálu. Pro výrobu kanálu, vzhledem k fyzikálním vlastnostem, byl zvolen tvrzený polystyren. Do kanálu, ve kterém byl umístěn senzor, byl za použití peristaltického čerpadla vháněn vzduch.

Pro průtokoměr byla provedena řada měření. Z dílčích výsledků vyplývá, že praktická realizace průtokoměru pro měření malých průtoků metodou spojitého topení má pracovní rozsah $0,035 \div 12 \text{ ml/min}$ při atmosférickém tlaku.

Jelikož měření průtoku bylo závislé na teplotě okolí, musela být tato závislost na teplotě odstraněna. Z pokusů bylo zjištěno, že snímání teploty okolí pomocí senzoru teploty umístěného na čipu je zavádějící. Tento senzor je ohříván topným elementem, který se nachází na společné keramické základně ve vzdálenosti přibližně 1mm.

V praxi tedy nelze tento odpor R_{temp} použít na měření teploty okolí. Proto bylo od použití tohoto snímače teploty upuštěno. Museli jsme tedy zavést do aplikace teplotu okolí pomocí odporového teploměru Pt100 a následně použít převodník teploty napětí. Touto teplotou a z toho plynoucím algoritmem bylo zamezeno ovlivnění měření průtoku vzduchu okolní teplotou.

Pro vizualizaci měření průtoku slouží programové prostředí vytvořené v CW. Vstupně-výstupní komunikaci zaručovala karta Advantech PCI 1716.

Dále bylo testováno použití senzoru FS2T pro pulzní topení. Bylo zjištěno, že pro toto použití je senzor nevhodný. Z tohoto důvodu byl sestrojen jiný průtokoměr, pracující na principu ohřevu topné spirálky a následného šíření tepla k senzoru teploty. Měření na tomto průtokoměru byly ověřeny teoretické poznatky o metodě pulzního topení. Bylo zjištěno, že rozsah navrženého průtokoměru je od 25 do 200ml/min. Aby bylo možno změřit průtoky v tomto rozsahu, muselo být zapůjčeno jiné peristaltické čerpadlo. Z předchozích poznatků lze říci, že metoda pulzního topení při výše uvedeném konstrukčním řešení je použitelná pro větší průtoky než jaké byly na počátku uvažovány.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku měření malých průtoků plynu. Cílem práce bylo navrhnout a realizovat kalorimetrický průtokoměr s využitím senzoru teploty FS2T firmy IST AG a provést metrologická měření. K vizualizaci měření malých průtoků bylo využito programového prostředí CW.

Práce je složena ze dvou částí: teoretické a praktické. V úvodu práce byly z různých literárních zdrojů zpracovány teoretické poznatky k problematice průtoků tekutin a jejich měření. Teoretická část shrnuje všeobecné informace o průtoku, typech proudění, měření malých průtoků tekutin a typech průtokoměrů. Dále se zabývá strukturou a studiem programového prostředí CW a popisem jeho funkcí.

Praktická část se zabývá popisem komponent, které jsou při tvorbě použity a vlastní tvorbou aplikace v prostředí CW. Popisuje navržení měřicího kanálu a provedení jeho konstrukce.

V práci jsou také zaznamenány hodnoty provedených metrologických měření malých průtoků plynu a graficky vyhodnoceny. Pro vizualizaci průtoku bylo nutno provést odstranění závislosti průtoku plynu na okolní teplotě. U navrženého průtokoměru se senzorem FS2T bylo testováno spojitě a pulzní topení. Měřením bylo zjištěno, že senzor FS2T pro pulzní topení není vhodný. Důvodem byla velká časová konstanta průtokoměru a určité ovlivňování senzoru teploty teplem vznikajícím topným elementem na společné keramické základně. Z tohoto důvodu byl pro ověření teoretických poznatků o pulzním topení sestaven jiný průtokoměr. Vzniklý průtokoměr pracoval na principu ohřevu senzoru teploty teplem šířícím se od topné spirálky. Jelikož topná spirálka a senzor teploty nejsou na společné základně, nemohlo docházet k tepelnému ovlivnění senzoru teploty.

U spojitěho topení bylo pro ověření pracovního rozsahu, přesnosti měření, časové konstanty snímače a průtokoměru využito peristaltické čerpadlo, u kterého je možné nastavit průtok v rozmezí od 0,0006 ml/min do 12 ml/min, dle zvoleného druhu hadičky. Z ověřovacích měření vyplynulo, že realizovaný snímač malých průtoků plynu je schopen měřit minimální objemový průtok plynu 0,035 ml/min.

Pro pulzní topení bylo z důvodu malého rozsahu předchozího čerpadla použito čerpadlo s rozsahem od 2ml/min do 200 ml/min. Při použití tohoto čerpadla byly ověřeny teoretické předpoklady chování vzniklé tepelné vlny.

Pro menší průtoky je přesnost měření průtoku malá, chyba měření je převážně způsobena peristaltickým čerpadlem, které obsahuje kladičky vhánějící plyn do průtokoměru. Při nižších otáčkách krokového motorku čerpadla se tento plyn vrací zpět.

Domnívám se, že cíl diplomové práce byl splněn. Byl navržen kalorimetrický průtokoměr s využitím senzoru FS2T a provedena metrologická měření. Všechna měřená data byla vizualizovaná a archivována v aplikaci CW.

FINISH

Presented diploma work is focused on measurement of the small gas flow. The aim of this work was proposed and there realized calorimetric flow-meter with temperature sensor FS2T from the company IST-AG and made metrological measuring. A program CW was used for visualisation of small gas flow measuring.

Diploma work consists of theoretic part and project. In theoretic part there is summary of data and formulas concerning with section gas flow, method of flow measurement. There was summary of flowing, sorts of flowing, small gas flow measuring and about sorts of flow-meters. In the following there was described structure and function of program CW.

The second part is based on description of components which were used in program CW and generation of application in CW. There was described generating of measuring channel and its compilation. In my diploma work there were evaluated values and graphic processing of metrological small gas flow measuring. For visualisation of gas flow a relation of gas flow to surrounding temperature was necessary to take out. Continuous and pulse heating was tested with proposed flow-meter with sensor FS2T. By measuring there was discovered fact that sensor FS2T was not acceptable for pulse heating. Reason was following, there was long time constant of flow-meter and sensor interaction with heat generated by heating element on common ceramic base. That is why there was complied another flow-meter for testing pulse heating. This one was heated by heating spiral and because spiral and sensor were not on the same base, sensor was not able to interact with another heat. Operating range, accuracy of measurement and time constant of sensor and flow-meter of continuous heating was checking by peristaltic pump, in which was possible to set flow rate in range from 0,0006 ml/min. to 12 ml/min. accordance with sort of hose. Test measuring demonstrated that realised small gas flow sensor was able to measured minimum content gas flow 0,035 ml/min. For pulse heating there was borrow pump with range from 2 ml/min. to 200 ml/min. because the previous one had to close range. Accuracy of measurement of gas flow was close for minor gas flow. Deviation of measuring was evoked with peristaltic pump that contains rollers for gas blasting to flow-meter. This gas was spaced back when the stepping motor speed of pump were inferior.

I think that the aim of my diploma work came true. There was projected calorimetric flow-meter with using FS2T sensor and realised metrological measuring. All data were ran and archived in application CW.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WEBSTER, J.: *The measurement, instrumentation and sensors*. Handbook, USA, 1999. ISBN 3-540-64830-5.
- [2] BASTIAN a kol.: *Praktická elektronika* Praha:Sobotales, 2004. 296s.
- [3] ĎADO, S. – KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha: ČVUT, 1999.
- [4] LAMMERING, T. S. – NIELS, R. *Micro/liquid flow sezsor. Senzore and Actuators A*. 1993
- [5] HRUŠKA, F. *Technické prostředky automatizace IV*. Zlín: UTB, FT, 2001. 107 s. ISBN 80-7318-026-X.
- [6] BRUUN, H. *Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis*. Oxford: Oxford University Press, 1996.
- [7] BÍLÝ, R. – CAGAŠ, P. – CAGAŠ, R. – HLADOVAKA, D. – KOLAŘÍK, M. – SOBOTÍK, M. – ZÁLEŠÁK, M. – ZAGABA, Z. *Katalog Control Web 2000*. 1. vyd. Praha: Computer Press, 1999. 382 s. ISBN 7226-258-0.
- [8] BAMBUCH, J. *Web vizualizace a řízení modelu teplotních soustav*. Diplomová práce. Zlín: UTB, 2003.
- [9] CHUDÝ, V. – PALENČÁR, R. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava: STU, 1999. 688 s. ISBN 80-227-1275-2.
- [10] HOLOTÍK, L.: *Měření malých průtoků tekutin pomocí teplotních senzorů*. Diplomová práce. Zlín: UTB, 2006.
- [11] HOFMANN, J.,URBANOVÁ, M.: *Fyzika I*. Praha: VSCHT, 1998. 241 s. ISBN 80-7080-314-2.
- [12] IST AG. *Thermal Based Flow Senzore*. [online]. c. 2007 [cit. 2007-02-06]. Dostupné z WWW: <<http://www.ist-ag.com/english/products/flow/flow.html>>.
- [13] ADVANTECH. *PCI 1711*. [online]. c. 2007 [cit. 2007-02-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.advantech.com.tw>>.
- [14] prozatímní texty Chemické inženýrství I+II pro VUT Brno, 2001
- [15] MORAVSKÉ PŘÍSTROJE A.S. *Dokumentace a software CW*. [online]. c. 2007 [cit. 2007-03-18].Dostupné z WWW: <<http://www.mii.cz>>
- [16] letáky firmy Moravské přístroje a.s.
- [17] ČERPADLA KOUŘIL. *Peristaltické čerpadlo PCD 21M*. [online]. c. 2007 [cit. 2007-04-02]. Dostupné z WWW: <<http://cerpadlakouril.cz>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A/D	Analog/digital. Analogově digitální převodník
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor. Komplementární polovodičový oxid kovu
CV	označení průměru hadičky
CW	Control web. Kontrolní web
DP	Diplomová práce
FET	Field effect transistor. Tranzistor řízený polem
FIFO	First In First Out. První dovnitř první ven
FS	Flow Sens. Průtokový senzor
GDI	Graphic device interface. Grafické rozhraní
HTML	Hypertext markup language. Hypertextové značení jazyka
http	Hypertext transfer protocol. Hypertextový převáděcí protokol
IP	International protection. Mezinárodní ochrana
JST	Japan solderless terminal. Japonský nepájený spoj
LIGA	Litho graphic. Lito grafie
MMI	Man Machine Interface. Rozhraní člověk stroj
OZ	Operační Zesilovač
PCI	Peripheral component interconnect. Vnější součást propojení
PCL	Property change listener. Vlastnost změny sledování
PLC	Programmable Logic Control. Programovatelné logické zařízení
PS	Plošný spoj
SAW	Surface acoustic wave. Povrchová akustická vlna
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition. Dohlížecí kontrola a získávání informací
SMD	Surface mount device. Povrchová montáž
SRAM	Synchronous Random Access Memory. Synchronní paměť s náhodným přístupem
WWW	World Wide Web. Světově široký web
ZIF	Zero insertion force. Nulová zasouvací síla

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Rychlostní profil pro různé druhy proudící tekutiny</i>	11
<i>Obr. 2. Princip Poiseuillova zákona</i>	15
<i>Obr. 3. Typy kalorimetrických průtokoměrů</i>	23
<i>Obr. 4. Princip kalorimetrického průtokoměru s odbočením</i>	24
<i>Obr. 5. Rozložení teploty v kalorimetrickém průtokoměru</i>	24
<i>Obr. 6. Princip teplotně značkovacího průtokoměru (vlevo průtokoměr se senzorem teploty po směru proudění plynu, vpravo průtokoměr se dvěma senzory)</i>	25
<i>Obr. 7. Průběh teploty u teplotně značkovacího průtokoměru</i>	25
<i>Obr. 8. Základní uspořádání termoanemometru</i>	26
<i>Obr. 9. Základní typy uspořádání termoanemometru</i>	29
<i>Obr. 10. Toolbar Control Webu</i>	31
<i>Obr. 11. Paleta virtuálních přístrojů</i>	32
<i>Obr. 12. Paleta průvodce přidáním virtuálních přístrojů</i>	33
<i>Obr. 13. Popis a vlastnosti nastavení přístroje</i>	34
<i>Obr. 14. Multifunkční karta PCI 1716</i>	38
<i>Obr. 15. Spuštění programu Device Manager</i>	39
<i>Obr. 16. Okno testu v Device Manager (analogový vstup)</i>	40
<i>Obr. 17. Okno testu v Device Manager (analogový výstup)</i>	40
<i>Obr. 18. Změna hexa čísla v souboru PCI 1716.par</i>	42
<i>Obr. 19. Nastavení typů kanálů v souboru PCI 1716.dmf</i>	42
<i>Obr. 20. Paměť ovladače</i>	44
<i>Obr. 21. Parametrický soubor pro rychlé děje</i>	47
<i>Obr. 22. Postup archivace dat u buffer kanálu</i>	50
<i>Obr. 23. Schéma měření s uvedením jednotlivých veličin</i>	50
<i>Obr. 24. Výsledná aplikace</i>	51
<i>Obr. 25. Konstrukční rozměry senzoru</i>	54
<i>Obr. 26. Elektronický obvod</i>	55
<i>Obr. 27. Závislost výstupního napětí můstku na rychlosti proudění</i>	55
<i>Obr. 28. Plošný spoj pro konektor senzoru</i>	56
<i>Obr. 29. Náčrt kanálu</i>	57
<i>Obr. 30. Princip činnosti čerpadla</i>	57

<i>Obr. 31. Schéma zesilovače s můstkem.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 32. Celkové zapojení senzoru a všech potřebných součástí.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 33. Vložení senzoru do měřícího kanálu.</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 34. Panel sušárny</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 35. Průtokoměr a potřebné komponenty</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 36. Reálné pracoviště</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 37. Nákres kanálu.....</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 38. Reálné zapojení průtokoměru.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 39. Celkové zapojení senzoru a všech potřebných součástí.....</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 40. Ukázka programového prostředí.....</i>	<i>82</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Měřicí principy mikrosenzorů průtoku</i>	28
<i>Tab. 2. Výpočet odhadu nejistoty měřicí karty</i>	37
<i>Tab. 3. Technické údaje senzorů</i>	53
<i>Tab. 4. Technické údaje čerpadla</i>	58

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1. Závislost změny pravého a levého odporu na teplotě</i>	65
<i>Graf 2. Závislost teplot T_1 a T_2 na čase při skokové změně teploty z 20°C na 60 °C.....</i>	66
<i>Graf 3. Závislost ΔU na průtoku Q při použití hadičky CV4.....</i>	67
<i>Graf 4. Závislost ΔU na průtoku Q při použití hadičky CV2.....</i>	68
<i>Graf 5. Závislost ΔU na rychlosti proudění v při použití hadičky CV4.....</i>	69
<i>Graf 6. Závislost ΔU na rychlosti proudění v při použití hadičky CV2.....</i>	70
<i>Graf 7. Dynamická charakteristika při skokové změně průtoku z 0 na 3,5 ml/min při použití hadičky CV2</i>	71
<i>Graf 8. Dynamická charakteristika při skokové změně průtoku z 0 na 12 ml/min při použití hadičky CV4</i>	72
<i>Graf 9. Závislost ΔU na průtoku při různých teplotách okolí</i>	73
<i>Graf 10. Závislost teploty T na napětí převodníku RU-1P</i>	74
<i>Graf 11. Závislost průtoku Q na ΔU při referenční teplotě.....</i>	75
<i>Graf 12. Závislost a na teplotě okolí</i>	76
<i>Graf 13. Závislost odporu termistoru na teplotě</i>	79
<i>Graf 14. Průběh napětí v čase při různém průtoku Q a vzdálenosti senzoru teploty 1mm</i>	83
<i>Graf 15. Průběh napětí v čase při různém průtoku Q a vzdálenosti senzoru teploty 2mm</i>	84

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Dokumentace karty Advantech	96
Příloha P II: OP297 datasheet.....	97
Příloha P III: Hodnoty statických a dynamických charakteristik senzoru.....	98
Příloha P IV: Hodnoty statických a dynamických charakteristik průtokoměru	100
Příloha P V: Data nutné k určení nezávislosti měření na teplotě	103

PŘÍLOHA P I: DOKUMENTACE KARTY ADVANTECH

Analog Input:

Channels	16 single-ended or 8 differential or combinatio						
Resolution	16-bit						
FIFO Size	1K samples						
Sampling Rate*	250 kS/s max.						
Conversion Time	2.5 μ s						
Input rang and Gain List	Gain	0.5	1	2	4	8	
	Unipolar	N/A	0-10	0-5	0-2.5	0-1.2	
	Bipolar	± 10	± 5	± 2.5	± 1.25	± 0.625	
Small Signal Bandwidth for PGA Gain	Gain	0.5	1	2	4	8	
	Bandwidth	4.0 MHz	4.0 MHz	2.0 MHz	1.5 MHz	0.65 MHz	
Common mode voltage	± 11 V max. (operational)						
Max. Input voltage	± 20 V						
Input Protect	30 Vp-p						
Input Impedance	100 M Ω /10pF(Off); 100 M Ω /100pF(On)						
Trigger Mode	Software, on-board programmable pacer or external						
Accuracy	DC	DNLE: ± 1 LSB					
		INLE: ± 1 LSB					
		Zero (Offset) error: Adjustable to ± 1 LSB					
	AC	Gain	0.5	1	2	4	8
		Gain error (% FSR)	0.15	0.03	0.03	0.05	0.1
		SNR: 82 dB					
ENOB: 13.5 bits							
THD: -84 dB typical							
Clocking and Trigger Inputs	Trigger Mode	Software, on-board programmable pacer or external					
	A/D pacer clock	250 kHz (max.); 58 μ Hz (min.)					
	External A/D trigger clock	Min. pulse width: 2 μ s (high); 2 μ s (low) Max. frequency: 250 kHz					

Analog Output: (Only for PCI-1716)

Channels	2	
Resolution	16-bit	
Operation mode	Single output	
Throughput*	200 kS/s max. per channel (FSR)	
Output Range (Internal & External Reference)	Using Internal Reference	0-+5V/0-+10 V, -5-+5V,-10-+10
	Using External Reference	0 - +x V @ +x V (-10 \leq x \leq 10) -x - +x V @ +x V (-10 \leq x \leq 10)
Accuracy	DC	DNLE: ± 1 LSB (monotonic)
		INLE: ± 1 LSB
		Zero (Offset) error: Adjustable to ± 1 LSB Gain (Full-scale) error: Adjustable to ± 1 LSB
Dynamic Performance	Setting Time	5 μ s to 4 LSB of FSR)
	Slew Rate	20 V/ μ s
Drift	10 ppm/°	
Driving Capability	± 20 mA	
Output Impedance	0.1 Ω max.	

Digital Input/Output:

Input Channels	16	
Input Voltage	Low	0.4V max.
	High	2.4 V min.
Input Load	Low	0.4 V max. @ -0.2mA
	High	2.7 V min. @ 20 μ A
Output Channels	16	
Output Voltage	Low	0.4 V max. @ +8.0mA (sink)
	High	2.4 V min. @ -0.4mA (source)

Counter/Timer:

Channels	3 channels, 2 channels are permanently configured as programmable pacers; 1 channel is free for user application	
Resolution	16-bit	
Compatibility	TTL level	
Base Clock	Channel 2: Takes input from output of channel 1 Channel 1: 10 MHz Channel 0: Internal 1MHz or external clock (10 MHz) max Selected by software	
Max. Input Frequency	1 MHz	
Clock Input	Low	0.8 V max.
	High	2.0 V min.
Gate Input	Low	0.8 V max.
	High	2.0 V min.
Counter Output	Low	0.5 V max. @ +24 mA
	High	2.4 V min. @ -15 mA

General:

I/O Connector Type	68-pin SCSI-II female	
Dimensions	175 mm x 100 mm (6.9" x 3.9")	
Power Consumption	Typical	+5 V @ 850 mA +12 V @ 600 mA
	Max.	+5 V @ 1 A +12 V @ 700 mA
Temperature	Operation	0-+60° C (32-158° F) (refer to IEC 68-2-1,2)
	Storage	-20-+85° C (-4-158° F)
Relative Humidity	Operation	5-85%RH non-condensing (refer to IEC 68-1,-2,-3)
	Storage	5-95%RH non-condensing (refer to IEC 68-1,-2,-3)
Certification	CE certified	

PŘÍLOHA P II: OP297 DATASHEET



Dual Low Bias Current Precision Operational Amplifier

OP297

FEATURES

- Low offset voltage: 50 μV maximum
- Low offset voltage drift: 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ maximum
- Very low bias current: 100 pA maximum
- Very high open-loop gain: 2000 V/mV minimum
- Low supply current (per amplifier): 625 μA maximum
- Operates from $\pm 2\text{ V}$ to $\pm 20\text{ V}$ supplies
- High common-mode rejection: 120 dB minimum

APPLICATIONS

- Strain gage and bridge amplifiers
- High stability thermocouple amplifiers
- Instrumentation amplifiers
- Photocurrent monitors
- High gain linearity amplifiers
- Long-term integrators/filters
- Sample-and-hold amplifiers
- Peak detectors
- Logarithmic amplifiers
- Battery-powered systems

GENERAL DESCRIPTION

The OP297 is the first dual op amp to pack precision performance into the space saving, industry-standard 8-lead SOIC package. The combination of precision with low power and extremely low input bias current makes the dual OP297 useful in a wide variety of applications.

Precision performance of the OP297 includes very low offset, under 50 μV , and low drift, below 0.6 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Open-loop gain exceeds 2000 V/mV, ensuring high linearity in every application.

Errors due to common-mode signals are eliminated by the common-mode rejection of over 120 dB, which minimizes offset voltage changes experienced in battery-powered systems. The supply current of the OP297 is under 625 μA .

The OP297 uses a super-beta input stage with bias current cancellation to maintain picoamp bias currents at all temperatures. This is in contrast to FET input op amps whose bias currents start in the picoamp range at 25 $^\circ\text{C}$, but double for every 10 $^\circ\text{C}$ rise in temperature, to reach the nanoamp range above 85 $^\circ\text{C}$. Input bias current of the OP297 is under 100 pA at 25 $^\circ\text{C}$ and is under 450 pA over the military temperature range per amplifier. This part can operate with supply voltages as low as $\pm 2\text{ V}$.

PIN CONFIGURATION

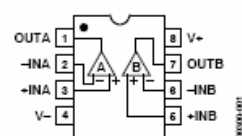


Figure 1.

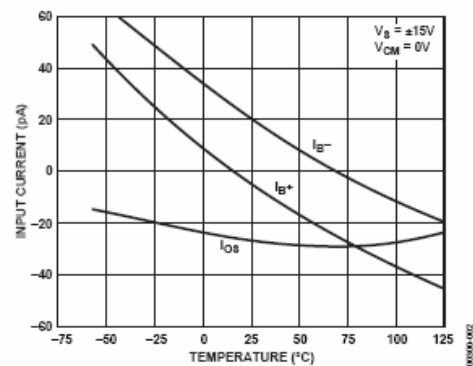


Figure 2. Low Bias Current over Temperature

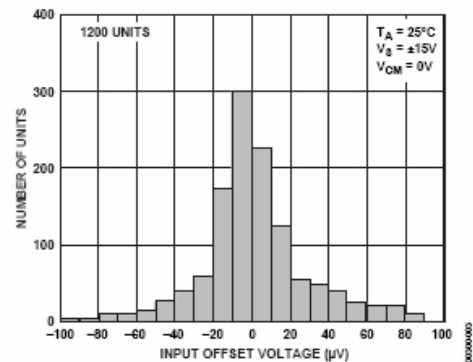


Figure 3. Very Low Offset

Combining precision, low power, and low bias current, the OP297 is ideal for a number of applications, including instrumentation amplifiers, log amplifiers, photodiode preamplifiers, and long term integrators. For a single device, see the OP97; for a quad device, see the OP497.

PŘÍLOHA P III: HODNOTY STATICKÝCH A DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK SENZORU

Teplota T [°C]	$R_{\text{pravý}}[\Omega]$	$R_{\text{levý}}[\Omega]$	$R_{\text{temp}}[\Omega]$
25	407	406	695
30	415	414	707
35	421	420	718
40	428	427	730
45	436	435	743
50	444	442	760
55	451	450	771
60	457	455	786
65	464	463	800
70	468	468	811
75	477	476	830
80	485	483	843

t [s]	$T1$ [°C]	$T2$ [°C]
0	20,5	20,4
0,02	20,5	20,4
0,04	26,9	26,8
0,06	33,3	33,2
0,08	39,7	39,6
0,1	42,8	42,7
0,12	46	45,9
0,14	49	48,9
0,16	52,4	52,3
0,18	53,7	54,8
0,2	55,6	55,5
0,22	55,6	55,5
0,24	57,4	57,3
0,26	57,5	57,4
0,28	58,6	58,5
0,3	58,8	58,7
0,32	59,2	59,1
0,34	58,8	58,7
0,36	58,8	58,7
0,38	58,8	58,7
0,4	57,7	58,9
0,42	58,8	58,7
0,44	58,8	58,7
0,46	58,8	58,7
0,48	58,7	58,6
0,5	58,8	58,7
0,52	58,5	58,4
0,54	58,5	58,4
0,56	58,5	58,4
0,58	58,5	58,4
0,6	57,7	57,6
0,62	58	57,9
0,64	58,8	58,7
0,66	58,2	58,1
0,68	58,8	58,7
0,7	58,8	58,7
0,72	58,8	58,7
0,74	58,8	58,7

PŘÍLOHA P IV: HODNOTY STATICKÝCH A DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK PRŮTOKOMĚRU

(1/3)

Při použití hadičky CV4, tj. průměr = 4mm			
nastavené hodnoty	Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
10	0,12	0,0018	0,0078
20	0,24	0,0035	0,0108
30	0,36	0,0053	0,0142
40	0,48	0,0071	0,0227
50	0,60	0,0088	0,0246
60	0,72	0,0106	0,0320
70	0,84	0,0124	0,0391
80	0,96	0,0141	0,0405
90	1,08	0,0159	0,0466
100	1,20	0,0177	0,0551
110	1,32	0,0194	0,0621
120	1,44	0,0212	0,0657
130	1,56	0,0230	0,0696
140	1,68	0,0248	0,0759
150	1,80	0,0265	0,0883
160	1,92	0,0283	0,0910
170	2,04	0,0301	0,0945
180	2,16	0,0318	0,1028
190	2,28	0,0336	0,1077
200	2,40	0,0354	0,1128
210	2,52	0,0371	0,1191
220	2,64	0,0389	0,1244
230	2,76	0,0407	0,1300
240	2,88	0,0424	0,1346
250	3,00	0,0442	0,1389
260	3,12	0,0460	0,1485
270	3,24	0,0477	0,1516
280	3,36	0,0495	0,1579
290	3,48	0,0513	0,1619
300	3,60	0,0530	0,1680
310	3,72	0,0548	0,1746
320	3,84	0,0566	0,1800
330	3,96	0,0583	0,1858

hadička CV2, tj. průměr = 2mm		
Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
0,035	0,00052	0,0035
0,070	0,00103	0,0052
0,105	0,00155	0,0058
0,140	0,00206	0,0073
0,175	0,00258	0,0084
0,210	0,00309	0,0098
0,245	0,00361	0,0106
0,280	0,00413	0,0125
0,315	0,00464	0,0137
0,350	0,00516	0,0156
0,385	0,00567	0,0167
0,420	0,00619	0,0183
0,455	0,00670	0,0190
0,490	0,00722	0,0203
0,525	0,00774	0,0212
0,560	0,00825	0,0221
0,595	0,00877	0,0233
0,630	0,00928	0,0241
0,665	0,00980	0,0258
0,700	0,01031	0,0270
0,735	0,01083	0,0281
0,770	0,01134	0,0292
0,805	0,01186	0,0303
0,840	0,01238	0,0309
0,875	0,01289	0,0320
0,910	0,01341	0,0328
0,945	0,01392	0,0348
0,980	0,01444	0,0360
1,015	0,01495	0,0370
1,050	0,01547	0,0386
1,085	0,01599	0,0401
1,120	0,01650	0,0418
1,155	0,01702	0,0428

PŘÍLOHA P IV: HODNOTY STATICKÝCH A DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK PRŮTOKOMĚRU

(2/3)

Při použití hadičky CV4, tj. průměr = 4mm			
nastavené hodnoty	Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
340	4,08	0,0601	0,1896
350	4,20	0,0619	0,1937
360	4,32	0,0636	0,1975
370	4,44	0,0654	0,2013
380	4,56	0,0672	0,2080
390	4,68	0,0690	0,2120
400	4,80	0,0707	0,2168
410	4,92	0,0725	0,2208
420	5,04	0,0743	0,2252
430	5,16	0,0760	0,2292
440	5,28	0,0778	0,2330
450	5,40	0,0796	0,2360
460	5,52	0,0813	0,2413
470	5,64	0,0831	0,2436
480	5,76	0,0849	0,2492
490	5,88	0,0866	0,2516
500	6,00	0,0884	0,2558
510	6,12	0,0902	0,2580
520	6,24	0,0919	0,2656
530	6,36	0,0937	0,2692
540	6,48	0,0955	0,2726
550	6,60	0,0972	0,2785
560	6,72	0,0990	0,2826
570	6,84	0,1008	0,2886
580	6,96	0,1025	0,2922
590	7,08	0,1043	0,2976
600	7,20	0,1061	0,3025
610	7,32	0,1078	0,3087
620	7,44	0,1096	0,3135
630	7,56	0,1114	0,3189
640	7,68	0,1132	0,3236
650	7,80	0,1149	0,3277
660	7,92	0,1167	0,3311

hadička CV2, tj. průměr = 2mm		
Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
1,190	0,01753	0,0437
1,225	0,01805	0,0445
1,260	0,01856	0,0452
1,295	0,01908	0,0460
1,330	0,01960	0,0478
1,365	0,02011	0,0488
1,400	0,02063	0,0499
1,435	0,02114	0,0511
1,470	0,02166	0,0525
1,505	0,02217	0,0535
1,540	0,02269	0,0551
1,575	0,02321	0,0564
1,610	0,02372	0,0575
1,645	0,02424	0,0585
1,680	0,02475	0,0599
1,715	0,02527	0,0605
1,750	0,02578	0,0618
1,785	0,02630	0,0630
1,820	0,02681	0,0640
1,855	0,02733	0,0652
1,890	0,02785	0,0664
1,925	0,02836	0,0675
1,960	0,02888	0,0688
1,995	0,02939	0,0702
2,030	0,02991	0,0718
2,065	0,03042	0,0726
2,100	0,03094	0,0733
2,135	0,03146	0,0750
2,170	0,03197	0,0767
2,205	0,03249	0,0773
2,240	0,03300	0,0786
2,275	0,03352	0,0798
2,310	0,03403	0,0809

PŘÍLOHA P IV: HODNOTY STATICKÝCH A DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK PRŮTOKOMĚRU

(3/3)

Při použití hadičky CV4, tj. průměr = 4mm			
nastavené hodnoty	Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
670	8,04	0,1185	0,3349
680	8,16	0,1202	0,3389
690	8,28	0,1220	0,3423
700	8,40	0,1238	0,3453
710	8,52	0,1255	0,3493
720	8,64	0,1273	0,3513
730	8,76	0,1291	0,3546
740	8,88	0,1308	0,3591
750	9,00	0,1326	0,3621
760	9,12	0,1344	0,3647
770	9,24	0,1361	0,3683
780	9,36	0,1379	0,3719
790	9,48	0,1397	0,3748
800	9,60	0,1414	0,3788
810	9,72	0,1432	0,3820
820	9,84	0,1450	0,3845
830	9,96	0,1467	0,3873
840	10,08	0,1485	0,3900
850	10,20	0,1503	0,3946
860	10,32	0,1520	0,3969
870	10,44	0,1538	0,3992
880	10,56	0,1556	0,4019
890	10,68	0,1574	0,4044
900	10,80	0,1591	0,4066
910	10,92	0,1609	0,4103
920	11,04	0,1627	0,4130
930	11,16	0,1644	0,4156
940	11,28	0,1662	0,4180
950	11,40	0,1680	0,4222
960	11,52	0,1697	0,4240
970	11,64	0,1715	0,4263
980	11,76	0,1733	0,4289
990	11,88	0,1750	0,4311
1000	12,00	0,1768	0,4328

hadička CV2, tj. průměr = 2mm		
Q[ml/min]	v[m/s]	$\Delta U[V]$
2,345	0,03455	0,0825
2,380	0,03507	0,0836
2,415	0,03558	0,0855
2,450	0,03610	0,0867
2,485	0,03661	0,0873
2,520	0,03713	0,0889
2,555	0,03764	0,0909
2,590	0,03816	0,0922
2,625	0,03868	0,0938
2,660	0,03919	0,0948
2,695	0,03971	0,0960
2,730	0,04022	0,0979
2,765	0,04074	0,0987
2,800	0,04125	0,0995
2,835	0,04177	0,1003
2,870	0,04228	0,1014
2,905	0,04280	0,1031
2,940	0,04332	0,1040
2,975	0,04383	0,1052
3,010	0,04435	0,1067
3,045	0,04486	0,1084
3,080	0,04538	0,1092
3,115	0,04589	0,1102
3,150	0,04641	0,1114
3,185	0,04693	0,1124
3,220	0,04744	0,1130
3,255	0,04796	0,1154
3,290	0,04847	0,1160
3,325	0,04899	0,1174
3,360	0,04950	0,1184
3,395	0,05002	0,1198
3,430	0,05054	0,1203
3,465	0,05105	0,1217
3,500	0,05157	0,1223

PŘÍLOHA P V: DATA NUTNÁ K URČENÍ NEZÁVISLOSTI MĚŘENÍ NA TEPLITĚ

		Závislost ΔU na Q při různých teplotách okolí							
		Teplota okolí [$^{\circ}\text{C}$]							
		20,4	23,9	24,9	26,0	27,0	32,0	35,0	37,3
Průtok Q [m^3/min]	12,0	0,4236	0,4135	0,4090	0,4042	0,3976	0,3962	0,3786	0,3680
	10,8	0,3993	0,3875	0,3846	0,3819	0,3761	0,3672	0,3539	0,3476
	9,6	0,3708	0,3641	0,3570	0,3527	0,3507	0,3388	0,3288	0,3258
	8,4	0,3424	0,3310	0,3222	0,3206	0,3172	0,3127	0,2957	0,2941
	7,2	0,2982	0,2909	0,2845	0,2841	0,2792	0,2721	0,2645	0,2560
	6,0	0,2544	0,2452	0,2425	0,2404	0,2376	0,2316	0,2234	0,2195
	4,8	0,2146	0,2179	0,2044	0,2023	0,1964	0,1937	0,1837	0,1825
	3,6	0,1591	0,1661	0,1602	0,1493	0,1490	0,1498	0,1505	0,1491
	2,4	0,1151	0,1179	0,1136	0,1088	0,1069	0,1056	0,1064	0,0954
	1,2	0,0655	0,0599	0,0609	0,0501	0,0542	0,0594	0,0574	0,0495
0,0	0,0025	0,0023	0,0014	0,0010	0,0011	0,0009	0,0013	0,0018	
		Koeficient a [-]							
		0,047215	0,041528	0,040161	0,038733	0,037874	0,032731	0,03105	0,029663

Závislost teploty T na napětí U_{Pt100}							
U_{Pt100} [V]	T [$^{\circ}\text{C}$]	U_{Pt100} [V]	T [$^{\circ}\text{C}$]	U_{Pt100} [V]	T [$^{\circ}\text{C}$]	U_{Pt100} [V]	T [$^{\circ}\text{C}$]
2,327	22,8	2,677	24,8	2,861	26,8	3,080	29,2
2,347	22,9	2,684	24,9	2,869	26,9	3,112	29,4
2,343	22,9	2,691	25,0	2,877	27,0	3,124	29,5
2,366	23,0	2,697	25,0	2,884	27,1	3,139	29,6
2,399	23,1	2,705	25,1	2,886	27,2	3,159	29,8
2,431	23,3	2,717	25,2	2,897	27,3	3,170	29,9
2,442	23,4	2,732	25,3	2,900	27,4	3,175	30,0
2,488	23,7	2,740	25,4	2,904	27,5	3,190	30,2
2,502	23,8	2,764	25,6	2,911	27,6	3,208	30,4
2,514	23,9	2,784	25,7	2,921	27,7	3,230	30,6
2,528	24,0	2,799	25,9	2,933	27,8	3,250	30,8
2,536	24,1	2,805	26,0	2,952	27,9	3,282	31,0
2,550	24,1	2,814	26,0	2,958	28,0	3,355	31,5
2,553	24,2	2,817	26,1	2,980	28,2	3,468	32,0
2,589	24,3	2,824	26,2	2,993	28,3	3,553	32,5
2,606	24,4	2,831	26,3	3,008	28,4	3,632	33,0
2,614	24,5	2,836	26,4	3,011	28,5	3,705	33,5
2,631	24,6	2,839	26,4	3,015	28,7	3,761	34,0
2,638	24,6	2,840	26,5	3,026	28,8	3,804	34,5
2,645	24,6	2,847	26,5	3,038	28,9	3,851	35,0
2,654	24,7	2,848	26,6	3,050	29,0	3,876	35,5
2,666	24,8	2,854	26,7	3,071	29,1	3,908	36,0