



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

TEPELNÝ PRŮTOKOMĚR

THERMAL FLOW MEASUREMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Beneš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jiří Beneš

ID: 186029

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Tepelný průtokoměr

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je návrh a realizace laboratorního přípravku pro demonstraci vlastností snímačů průtoku kapalin založených na tepelném principu. Zadání lze shrnout do následujících bodů:

1. Podrobně zpracujte problematiku tepelných průtokoměrů kapalin – termoanemometrů a kalorimetrických průtokoměrů – princip, matematický model, konstrukce, měřicí obvody, způsoby potlačení parazitní vlivů.
2. Navrhněte a realizujte laboratorní přípravek pro měření průtoku vody, umožňující testování parazitních vlivů na přesnost měření průtoku. Předpokládaný rozsah průtoku do 5l/min.
3. Navrhněte a realizujte potřebné elektronické obvody průtokoměru, předpokládejte využití čidla P1K0/050 firmy IST.
4. Proveďte základní ověřovací měření přesnosti realizovaného průtokoměru a výsledky diskutujte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BAKER, R.C. Flow measurement handbook. Cambridge University Press, New York, 2000.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením vlastností termo anemometrického snímače PIK0/50. První část tvoří teoretický popis termo anemometrických principů, jejich vyhodnocování, parazitní vlivy působící na snímače a přehled nejdůležitějších vlastností snímače. Druhá část práce se potom zabývá návrhem a realizací měřicí trasy pro proměření těchto vlastností. Výsledkem práce je ověření vlastností snímače PIK0/50, vytvoření jeho matematického modelu a stanovení možné využitelnosti snímače v laboratorní výuce.

Klíčová slova

Měření průtoku, termo anemometrický snímač, parazitní vlastnosti

Abstract

This bachelor thesis deals with verification of properties of termo anemometric sensor PIK0 / 50. The first part consists of a theoretical description of termo anemometric principles, their evaluation, parasitic influences on the sensors and an overview of the most important features of the sensor. The second part of the thesis deals with the design and implementation of the measuring track for measuring these properties. The result of this work is to verify the properties of the PIK0 / 50 sensor, to create its mathematical model and to determine the possible applicability of the sensor in laboratory teaching.

Keywords

Flow measurement, termo anemometric sensor, parasitic properties

Bibliografická citace:

Citace tištěné práce:

BENEŠ, Jiří. *Tepelný průtokoměr*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119268>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš.

Citace elektronického zdroje:

BENEŠ, Jiří. *Tepelný průtokoměr* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119268>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Petr Beneš.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Tepelný průtokoměr jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **15. května 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **15. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

1. Úvod	- 11 -
2. Přehled nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku kapalin	- 12 -
3. Přehled parazitních vlivů snímačů průtoku kapalin	- 14 -
4. Typy proudění media	- 15 -
4.1. Laminární proudění	- 15 -
4.2. Turbulentní proudění	- 15 -
4.3. Výpočet Reynoldsova čísla	- 15 -
5. Typy průtoků kapaliny v hydraulickém vedení	- 16 -
5.1. Hmotnostní průtok	- 16 -
5.2. Objemový průtok	- 16 -
5.3. Rychlostní průtok	- 16 -
5.4. Přepočet průtoku	- 16 -
6. Kalorimetrické průtokoměry	- 17 -
6.1. Princip kalorimetrického průtokoměru	- 17 -
6.2. Konstrukce kalorimetrického průtokoměru	- 18 -
6.3. Měřicí obvody kalorimetrického průtokoměru	- 19 -
7. Termoanemometry	- 19 -
7.1. Princip	- 19 -
7.2. Sestavení matematického modelu termoanemometru	- 20 -
7.3. Konstrukce termoanemometru	- 21 -
7.4. Měřicí obvody pro TERMO-ANEMOMETRY	- 21 -
7.4.1. Měřicí obvod pro CCA režim	- 21 -
7.4.2. Měřicí obvod pro CTA režim	- 22 -
8. Přehled použitých snímačů a zařízení	- 24 -
9. Praktické měření a vyhodnocení výsledků	- 26 -
9.1. Proměření referenčního snímače průtoku	- 26 -
9.1.1. Nejistota měření napětí při hmotnostní průtoku	- 27 -
9.2. Schéma CCA zapojení	- 28 -
9.3. Odvození vzorců pro výpočet CCA zapojení	- 28 -
9.4. Určení konstant matematického modelu	- 30 -
9.5. Ověření teplotní závislosti matematického modelu	- 33 -
9.6. Ověření vlivu změny proudu na CCA zapojení snímače P1K0/50	- 36 -
9.7. Ověření vlastnosti CCA v opačném zapojení	- 38 -

10. Výpočet nejistot měření snímače P1K0/50 v CCA zapojení	- 40 -
11. CTA zapojení snímače P1K0/50	- 42 -
11.1. CTA zapojení –nulový průtok.....	- 42 -
11.2. Ověření výstupních charakteristik CTA zapojení.....	- 43 -
11.3. CTA zapojení– ověření tep. závislosti výstupních charakteristik.....	- 44 -
12. Teoretický návrh automatické měřicí trasy	- 45 -
13. Návrh poloautomatického měření v LabView	- 49 -
14. Závěr	- 50 -
15. Zdroje	- 52 -
16. Přílohy	- 54 -

Seznam obrázků

Obr. 1 Příklad určení linearity [4].....	- 13 -
Obr. 2 Princip fungování kalorimetru[6].....	- 17 -
Obr. 3 Dvouosý MEMS kalorimetrický průtokoměr[7].....	- 18 -
Obr. 4 Schématické znázornění kalorimetru v kapiláře[7].....	- 18 -
Obr. 5 Zapojení kalorimetrického průtokoměru[7]	- 19 -
Obr. 6 Princip termoanemometru[8].....	- 19 -
Obr. 7 schéma zapojení anemometru v CCA zapojení[10]	- 21 -
Obr. 8 schéma zapojení termoanemometru v můstkovém CCA zapojení[10]	- 22 -
Obr. 9 schéma CTA zapojení bez kompenzace vlivu teploty[10]	- 22 -
Obr. 10 schéma CTA zapojení s kompenzací vlivu teploty[10].....	- 23 -
Obr. 11 schéma měřicí trasy pro CCA.....	- 28 -
Obr. 12 Schématické zapojení snímače P1K0/50 ve směru proudění	- 30 -
Obr. 13 Schématické zapojení snímače P1K0/50 v opačném směru.....	- 38 -
Obr. 14 Blokové schéma kombinace zapojení CCA a CTA	- 45 -
Obr. 15 Schéma kombinovaného obvodu CCA a CTA.....	- 47 -
Obr. 16 Deska kombinovaného obvodu CCA a CTA	- 48 -
Obr. 17 Přední panel programu LabView.....	- 49 -
Obr. 18 Blokový diagram v programu LabView.....	- 49 -

Seznam grafů

Graf. 1 Kalibrační křivka váhy Omega.....	- 26 -
Graf. 2 Parametr A pro sestavení matematického modelu	- 30 -
Graf. 3 parametr B pro určení matematického modelu	- 31 -
Graf. 4 Chyba průtoku při sestavování matematického modelu.....	- 32 -
Graf. 5 Parametr B pro různou teplotu media s interním měřením teploty	- 33 -
Graf. 6 Parametr B pro různou teplotu media s externím měřením teploty	- 33 -
Graf. 7 Chybovost průtoku pro rozdílné teploty media	- 34 -
Graf. 8 Chybovost průtoku pro rozdílné teploty media s exter. měřením teploty -	35 -
Graf. 9 Parametr B pro různá proudová nastavení	- 36 -
Graf. 10 Chybovost průtoku pro různá proudová nastavení.....	- 37 -
Graf. 11 Parametr B v opačném směru CCA	- 38 -
Graf. 12 Chybovost průtoku pro opačný směr CCA	- 39 -
Graf. 13 Graf výstupního napětí pro CTA zapojení v různých modech.....	- 42 -
Graf. 14 závislost výstupního V na Δt , pro nulový průtok	- 42 -
Graf. 15 Výstupní napětí CTA zapojení pro různé průtoky	- 43 -
Graf. 16 Srovnání výstupního napětí CTA pro různé teploty.....	- 44 -

1. Úvod

Měření průtoku kapalin patří mezi základní měření neelektrických veličin. V dnešní době je velký tlak na malá a velice přesná dávkování různých typů kapalin obzvláště ve zdravotnictví a výzkumu. Z toho důvodu se požadavky na přesné měření průtoku neustále zvyšují.

Cílem bakalářské práce je tedy vytvořit měřicí trasu pro ověření vlastností termo-anemometrického snímače P1K0/50. Na této měřicí trase bude možné proměřit parazitní jevy působící na tento snímač. Z naměřených dat potom stanovit model snímače a vytvořit obslužný program pro automatizování měřicího procesu.

První část práce se bude zabývat teoretickým popisem použitých snímačů a teoretických poznatků. Nejdříve budou vysvětleny jednotlivé vlastnosti snímačů a nejdůležitější parazitní vlivy působící na tyto snímače. Dále bude popsán teoretický princip jednotlivých použitých snímačů a jejich vlastností.

V druhé části bude rozepsáno sestavení měřicí trasy a vysvětleno použití jednotlivých prvků. Následovat bude praktická část měření, kde budou proměřeny základní charakteristiky snímače a parazitní vlivy ovlivňující měření. Výsledkem měření bude matematický model popisující vlastnosti snímače P1K0/50. V závěru práce budou porovnány naměřená data se stanovenými teoretickými předpoklady.

Celá měřicí trasa bude připojena ke stávajícímu zapojení laboratorní úlohy a bude využívat připojené více stupňového čerpadlo pro přívod media do měřicí trasy. Výstup snímačů bude zpracováván měřicí kartou a odesílán do připojeného počítače ke zpracování.

Pro ověření výsledků budou použity referenční snímače umístěny v laboratorní úloze. Srovnáním výsledků měření s referenčními měřidly bude zajištěna správnost výsledného matematického modelu snímače.

2. Přehled nejdůležitějších parametrů snímačů průtoku kapalin

Bakalářská práce se zabývá proměřením anemometrického snímače průtoku. Pro správné vyhodnocení naměřených výsledků je důležité znát parametry tohoto snímače. V následující části práce se tedy zabývám definováním těchto parametrů:

Nejistota

Jako nejistota měření je obvykle definován určitý parametr, který bezprostředně souvisí s výsledkem a charakterizuje rozpětí hodnot, v nichž se nachází výsledná naměřená hodnota vůči hodnotě pravé. Skutečný výsledek se tedy pohybuje v určitém intervalu okolo naměřené hodnoty např. $4,81 \pm 0,21$ g. Celková nejistota má potom dvě hlavní složky, nejistotu typu A a nejistotu typu B. [1]

Přesnost

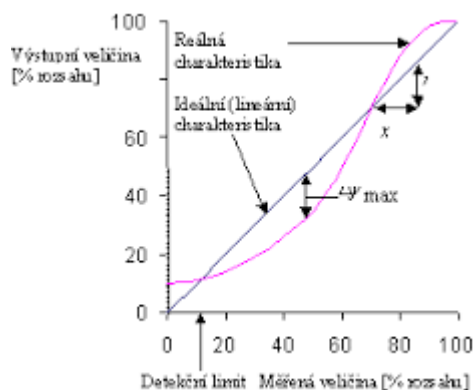
Chyba měření je rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou měřením. Během měření se uplatňují vlivy, které se projeví odchylkou mezi skutečnou a naměřenou hodnotou reálně měřené veličiny. Velikost této chyby závisí na přesnosti měřicího přístroje a přesnosti měřicí metody. [2]

Opakovatelnost

Jedná se o referenční měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření. Podmínka opakovatelnosti měření zahrnuje stejný postup měření, stejný obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo, a opakování měření na stejném nebo podobných objektech v krátkém časovém úseku. Výsledkem je míra shody takto provedených měření. [3]

Linearita (Linearity)

Maximální odchylka mezi ideální lineární charakteristikou a skutečnou charakteristikou se nazývá nelinearita nebo linearita. Hodnota je udána jako procento měřicího rozsahu.



Obr. 1 Příklad určení linearit [4]

Tlaková ztráta (Pressure loss)

Ve většině případů dochází při měření průtoku kapalin k ovlivnění media snímači. Toto ovlivňování závisí na fyzikálním principu snímače a na jeho konstrukci, tato změna se označuje jako hydraulický odpor.

Se zvyšujícím se průtokem roste i hydraulický odpor a tím roste i výsledná tlaková ztráta. Tuto tlakovou ztrátu můžeme určit z Bernoulliho rovnice, která popisuje zachování mechanické energie pro ideální kapalinu v uzavřené trubici:

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

p	tlak	[p]
v	rychlost proudění	[m*s ⁻¹]
ρ	hustota media	[kg*m ⁻³]

Maximální tlak (Maximal pressure)

Největší možný tlak měřený snímačem. Při vyšších hodnotách tlaku dochází k postupnému poškozování snímače nebo k jeho úplnému zničení.

Nominální průtok (Nominal flow)

Nominální průtok je průtok, kdy výrobce ručí za správnost naměřených dat. Obvykle tato hodnota odpovídá polovině měřicího rozsahu, ale není to pravidlem.

Způsob připojení snímače

Způsob připojení snímače je vždy uveden v jeho manuálu. Pokud je snímač připojen jinak, než uvádí výrobce dochází k měření špatných dat. Pro většinu průtokoměrů platí že jsou v přímém kontaktu s měřeným mediem. U takto zapojených snímačů dochází k tlakové ztrátě.

3. Přehled parazitních vlivů snímačů průtoku kapalin

Okolní podmínky

Ideální průtokoměr by neměl být ovlivněn okolními podmínkami, tak tomu ale v praxi není. Je důležité, aby všechny okolní vlivy byly zaznamenávány, hlavně vlivy ovlivňující chování měřené kapaliny nebo ovlivňující snímač. Pokud je dopředu známo, že přístroj bude vystaven nežádoucím okolním vlivům (např. teplota, tlak...), je třeba volit průtokoměr odolný na předpokládané okolní vlivy nebo měření uzpůsobit tak aby byly tyto vlivy eliminovány.

Kapalina

Snímače jsou definovány pro určité složení kapaliny. V praktických podmínkách je velice obtížné dosáhnout ideálního složení kapaliny. Čím víc se bude lišit složení námi měřené kapaliny od ideálního složení, tím víc se samozřejmě budou lišit i naměřené údaje. Chování kapaliny může ovlivnit množství příměsí, teplota nebo vzduchové bubliny.

Teplota

Teplota ovlivňuje fyzikální vlastnosti látek jako je např. hustota, viskozita atd. Proto je důležité po celou dobu měření pečlivě měřit teplotu media v měřicím kanále a tuto teplotu zohledňovat při výpočtech.

Nestabilní tok

Pro správnost měření je důležitý i stabilní tok media. Pokud jsou v měřicí trase umístěny zatáčky nebo překážky v toku musíme potom zvolit dostatečně dlouhou uklidňující vzdálenost. Touto vzdáleností se rozumí rovný úsek měřicí trasy dostatečně dlouhý na to, aby došlo ke stabilizaci toku media. Tato vzdálenost je závislá na rozměrech měřicí trasy a na rychlosti toku měřeného media.

Neúplné zaplnění

Pod tímto pojmem se rozumí případ, kdy se v měřeném mediu nachází vzduchové bubliny, nebo nedojde k úplnému zaplnění měřeného kanálu, to může ovlivnit měření. Tato podmínka je obzvlášť důležitá u snímačů s odporovým principem měření průtoku media.

Materiál potrubí

Mnoho průtokoměrů je citlivých na skokovou změnu průměru potrubí, nejlépe je aby se celé měřicí trasa skládala z jednoho rozměru potrubí. Pro toto měření je důležité, aby drsnost materiálu potrubí neovlivňovala profil toku media.

4. Typy proudění media

V případě této bakalářské práce se mohou objevit dva typy proudění laminární a turbulentní. S těmito typy proudění je spojeno Reynoldsovo číslo, jedná se o číslo, které určuje kdy se mění laminární proudění na turbulentní proudění a obráceně.

4.1. Laminární proudění

Laminární proudění je takové proudění, při kterém nedochází k promíchávání kapaliny. Částice kapaliny se pohybují ve vrstvách. Kapalina která je v kontaktu s povrchem hydraulického vedení se pohybuje pomaleji než tekutina ve středu hydraulického vedení. Laminární proudění se vyskytuje v hydraulickém vedení s $Re < 2320$.

4.2. Turbulentní proudění

Turbulentní proudění je takové proudění, při kterém dochází k promíchávání kapaliny. Částice kapaliny se pohybují chaoticky a rychlost jednotlivých částic tekutiny se nepravidelně mění. Laminární proudění se vyskytuje v hydraulickém vedení s $Re > 2320$.

4.3. Výpočet Reynoldsova čísla

$$Re = \frac{v_s * d}{\nu}$$

Rov. 2

<i>Re</i>	<i>Reynoldsovo číslo</i>	<i>[Kg*s⁻¹]</i>
<i>vs</i>	<i>střední rychlost proudění</i>	<i>[Kg]</i>
<i>d</i>	<i>průměr kanálu</i>	<i>[s]</i>
<i>ν</i>	<i>viskozita media</i>	<i>[Kg*s⁻¹]</i>

Pozn.

Z výše uvedených veličin je teplotou závislá pouze kinematická viskozita vody ν . Pro vodu o teplotě 20 °C je $\nu = 1,00410^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Pro další výpočty je použita tato hodnota.

5. Typy průtoků kapaliny v hydraulickém vedení

Hydraulický průtok lze vyjádřit buďto jako hmotnostní/objemový průtok media nebo jako rychlostí průtok media, mezi těmito průtoky lze snadno převádět. Pro některé snímače platí, že dokáží měřit jeden nebo druhý typ průtoky.

5.1. Hmotnostní průtok

Jako hmotnostní průtok se označuje hmotnost tekutiny (kapaliny nebo plynu), která za jednotku času projde průtočným průřezem v určitém systému (hydraulickém potrubí).

V angličtině se tato veličina potom nazývá mass flow rate.[5]

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad \text{Rov. 3}$$

Q_m	<i>hmotnostní průtok</i>	$[Kg*s^{-1}]$
dm	<i>změna hmotnosti</i>	$[Kg]$
dt	<i>změna času</i>	$[s]$

5.2. Objemový průtok

Jedná se o průtok, který je definován, jako objemové množství kapaliny, které projde daným průřezem hydraulického potrubí za určitý čas. [5]

$$Q_v = \frac{dV}{dt} \quad \text{Rov. 4}$$

Q_v	<i>Objemový průtok</i>	$[m^3*s^{-1}]$
dV	<i>změna objemu</i>	$[m^3*s^{-1}]$
dt	<i>změna času</i>	$[kg*m^{-3}]$

5.3. Rychlostní průtok

Rychlostní průtok je definován jako rychlost částic proudění v definovaném průřezu. S tímto typem průtoky pracují převážně turbínové, vírové, elektromagnetické a ultrazvukové průtokoměry.

$$v_s = \frac{ds}{dt} \quad \text{Rov. 5}$$

v_s	<i>rychlostní průtok</i>	$[m*s^{-1}]$
ds	<i>změna dráhy</i>	$[m]$
dt	<i>změna času</i>	$[s]$

5.4. Přepočítání průtoků

Jednotlivé typy průtoků lze mezi sebou přepočítávat. Pro nestlačitelné kapaliny platí:

$$Q_m = Q_v * \rho \quad \text{Rov. 6}$$

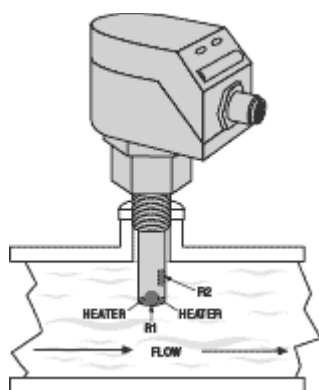
Q_m	<i>Hmotnostní průtok</i>	$[Kg*s^{-1}]$
Q_v	<i>Objemový průtok</i>	$[m^3*s^{-1}]$
ρ	<i>hustota media</i>	$[kg*m^{-3}]$

6. Kalorimetrické průtokoměry

Kalorimetrické snímače jsou snímače měřící hmotnostní průtok, obvykle používají na menší průtoky než termo-anemometry maximálně do $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ a jejich přesnost je maximálně $\pm 2 \%$.

6.1. Princip kalorimetrického průtokoměru

Kalorimetrický průtokoměr je tvořen žhavicím tělískem a dvěma senzory teploty media. Kalorimetrický průtokoměr pracuje na principu přenosu tepla ze žhavicího tělíska do proudícího media (z media posléze na senzor teploty media). Je-li průtok nulový potom jsou oba dva senzory teploty zahřívány stejnoměrně, platí pouze pokud jsou senzory umístěny symetricky. Dojde-li ke zvýšení průtoku, potom bude ohříván více jeden ze snímačů. Výsledná hodnota průtoku je potom určena jako diference mezi dvěma senzory teploty media, tímto způsobem měření se potlačuje vliv teploty okolí.



Obr. 2 Princip fungování kalorimetru[6]

Tím že výstup snímače je vyhodnocován diferenčně dojde ke zdvojnásobení citlivosti. Na oba dva senzory působí stejné parazitní vlivy. Diferenčním zapojením jsou ve výsledku tyto parazitní vlivy navzájem potlačeny. Pro výstupní signál platí, že závislost výstupního signálu a hmotnostního průtoku Q_m je v omezeném rozsahu lineární:

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

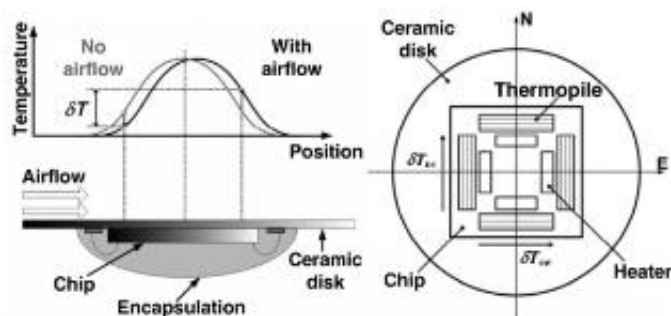
Rov. 7

p	<i>tlak</i>	$[p]$
v	<i>rychlost proudění</i>	$[m \cdot s^{-1}]$
ρ	<i>hustota media</i>	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ	<i>hustota media</i>	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ	<i>hustota media</i>	$[kg \cdot m^{-3}]$

6.2. Konstrukce kalorimetrického průtokoměru

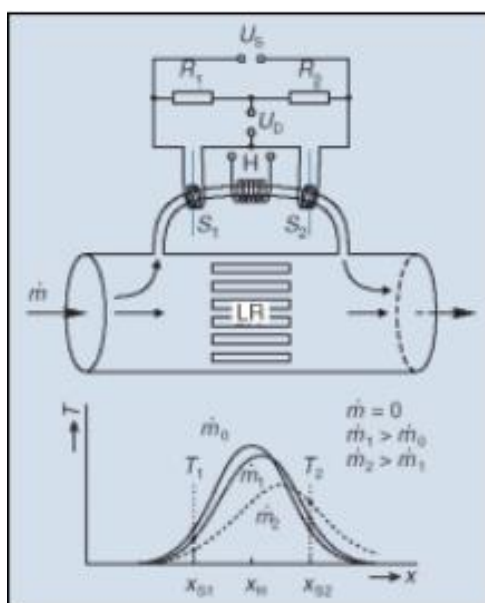
Existují dva druhy konstrukce kalorimetrických průtokoměrů a to v závislosti na místě měření:

-v **přímém kanálu** – senzory jsou umístěn přímo v hlavním kanálu s protékajícím médiem. V hlavním kanálu jsou senzory velice namáhány a hrozí jejich poškození. Vedení media je narušeno a hrozí tím pádem unik media. Do této kategorie patří i MEMS kalorimetrické průtokoměry.



Obr. 3 Dvouosý MEMS kalorimetrický průtokoměr[7]

-v **obloukové kapiláře** – senzory jsou umístěny v tenké obloukové kapiláře, díky délce kapiláry lze dosáhnout čistě laminárního proudění. Pro zachování poměru proudění mezi hlavním kanálem a tenkou kapilárou musí být jak v hlavním kanálu tak v kapiláře laminární proudění.[2]

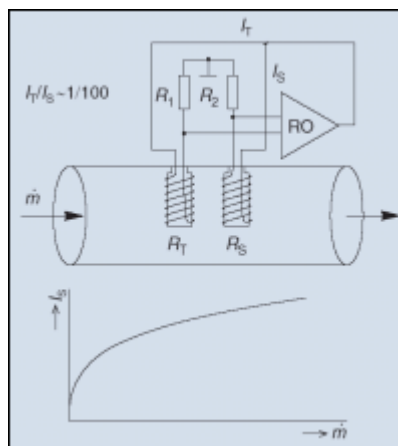


Obr. 4 Schématické znázornění kalorimetru v kapiláře[7]

Pro zachování ideálního laminárního proudění, musí být poměru proudění mezi hlavním kanálem a kapilárou typicky 1:100.

6.3. Měřící obvody kalorimetrického průtokoměru

Měřící obvody pro kalorimetrické průtokoměry udržují konstantní rozdíl mezi topným tělískem a snímači teploty například pomocí Wheatstoneůva můstku a operačního zesilovače. Obvod pro topné tělísko je tvořen vhodným zdrojem, který slouží pro napájení topného tělíska.



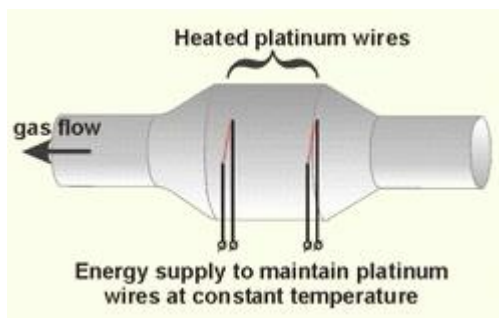
Obr. 5 Zapojení kalorimetrického průtokoměru[7]

7. Termoanemometry

Termoanemometry (v anglické literatuře jsou označovány pojmem HOT WIRE PROBES, tedy sondy s vyhříváním drátkem). Jedná se o průtokoměry měřící hmotnostní průtok s velkou přesností, nicméně mezi jejich nedostatky patří menší rozsah měřeného průtoku. Tento rozsah se pohybuje 10^{-4} až $1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$.

7.1. Princip

Principiálně je tento druh snímače tvořen žhavicím tělískem a senzorem teploty media (žhaveným tělískem). Termo-anemometry mohou pracovat ve dvou režimech, zaprvé proud topným tělískem je konstantní CCA metoda (z angličtiny constant current anemometer), nebo je udržována konstantní teplota/rozdíl teplot, potom se jedná o CTA metodu (z angličtiny constant temperature anemometer).



Obr. 6 Princip termoanemometru[8]

Pozn. termoanemometry lze měřit plyn i kapalinu

7.2. Sestavení matematického modelu termoanemometru

Termoanemometry pracují na principu přenosu tepla z žhavicího drátku do proudící tekutiny a tím dochází k jeho ochlazení. Touto teorií se zabývá spousta materiálů. Odvození výsledného Kingova zákona je velice náročný proces a pro měření je nepodstatný. Celý postup odvození lze najít např. v literatuře :

Měření průtoku a výšky hladiny / Bejček L., Ďaďo S., Platil A.

Použitím literatury můžeme vytvořit vztah pro popis termo-anemometru. Tento vztah se nazývá Kingův zákon[9]:

$$R_H * I_h^2 = \lambda * \pi * l * \Delta T * Nu \quad \text{Rov.8}$$

R_H	<i>elektrický odpor topného tělíska</i>	$[\Omega]$
I_h	<i>proud topným tělískem</i>	$[A]$
ΔT	<i>rozdíl tepla</i>	$[oC]$
Nu	<i>Nusseltovo číslo</i>	$[-]$
l	<i>délka žhaveného drátu</i>	$[m]$
π	<i>pí</i>	$[-]$
λ	<i>tepelná vodivost</i>	$[Wm^{-1}K^{-1}]$

Vhodnou substitucí potom lze získat zjednodušený tvar[5]:

$$P_h = R_h * I_h^2 = (A + B * v^{0,5}) * \Delta T \quad \text{Rov.9}$$

R_H	<i>elektrický odpor topného tělíska</i>	$[\Omega]$
I_h	<i>proud topným tělískem</i>	$[A]$
ΔT	<i>rozdíl tepla</i>	$[oC]$
A	<i>parametr A</i>	$[W K^{-1}]$
B	<i>parametr B</i>	$[W s^{0,5} K^{-1} m^{-0,5}]$

Pro určování parametru A a B platí, že by měli být určeny experimentálně pro konkrétní snímač nebo pro konkrétní zapojení a to z následujících důvodů:

-Fyzikální vlastnosti použitých materiálů se téměř vždy liší od tabulkových hodnot.

-Teplota topného tělíska není rovnoměrně rozložena po celé délce a její rozložení závisí na přívodních vodičích

7.3. Konstrukce termoanemometru

Žhavicí drátek se nejčastěji vyrábí ve tvaru odporového drátu, který je natažen mezi jehlovými hroty. Pro zajištění nesměrovosti tohoto snímače je možné využít až kombinaci tří vhodně natočených elementů, potom se jedná o třidimenzionální snímač.

Některé snímače používají žhavicí tělíska napařena na keramickou destičku nebo trubičku. Pro zabránění ohřívání kompenzačního snímače teploty media se používají keramické destičky s malou tepelnou vodivostí. Tento typ snímače je směrový.

Mezi další možné konstrukce patří konstrukce s masivním žhavicím tělískem, to je vyrobeno z kovu nebo polovodiče. Tento typ snímače může mít různé tvary, pro zlepšení jeho vlastností se volí povrchová úprava potažení platinou nebo zlatem. Do této kategorie patří termoanemometry s perličkovým termistorem.

7.4. Měřící obvody pro TERMO-ANEMOMETRY

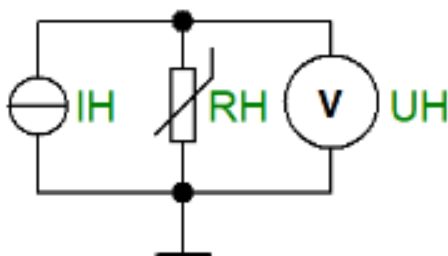
Pro termo-anemometry platí, že mohou pracovat ve dvou režimech CCA režimu, tedy v režimu s konstantním proudem a v režimu CTA, tedy v režimu s konstantním rozdílem teplot. Každé z těchto zapojení má své výhody i nevýhody a obecně tedy nelze specifikovat, které z nich je lepší.

7.4.1. Měřící obvod pro CCA režim

Měřící obvod udržuje konstantní elektrický proud žhavicím tělískem. V důsledku působení el. proudu se topné tělísko zahřívá to způsobí změnu el. Odporu tělíska. Tuto změnu odporu lze vypočítat ze známého vztahu:

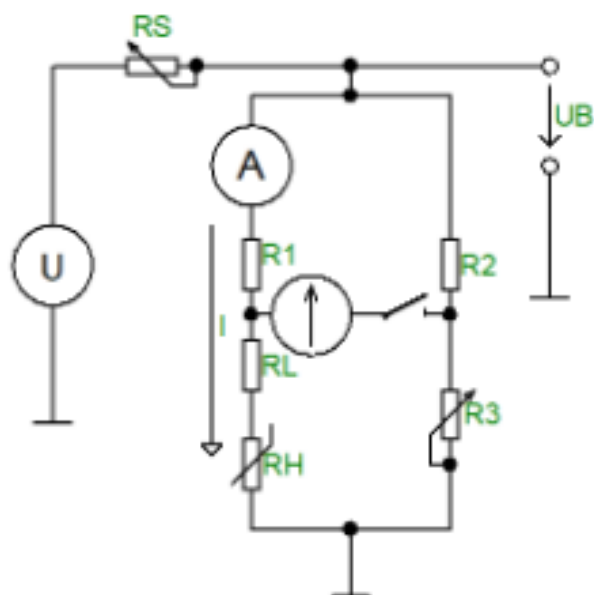
$$R_h = \frac{U_h}{I_h} \quad \text{Rov.10}$$

R_H	<i>elektrický odpor topného tělíska</i>	$[\Omega]$
I_h	<i>proud topným tělískem</i>	$[A]$
U_H	<i>elektrické napětí topného tělíska</i>	$[V]$



Obr. 7 schéma zapojení anemometru v CCA zapojení[10]

Pro měřící obvod CCA zapojení můžeme využít tří vodičově nebo čtyř vodičově zapojení pro měření odporu topného tělíska.

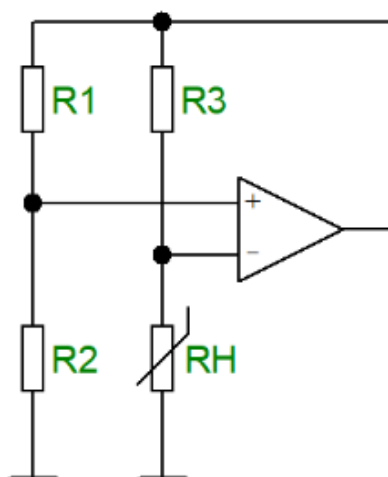


Obr. 8 schéma zapojení termoanemometru v můstkovém CCA zapojení[10]

7.4.2. Měřicí obvod pro CTA režim

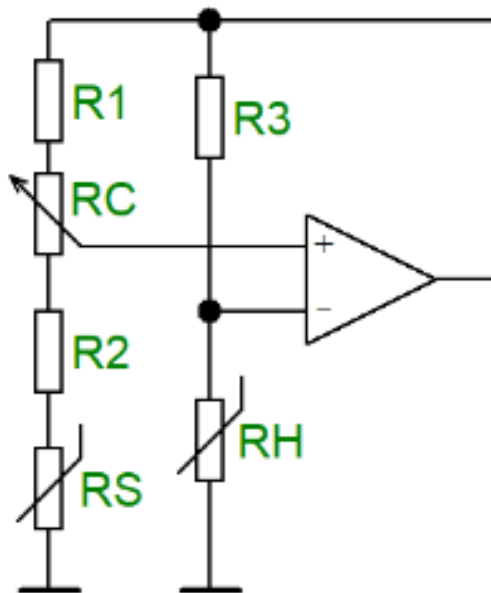
Měřicí odvod CTA zapojení udržuje konstantní teplotu tělíka, popřípadě konstantní rozdíl teploty media a žhavicího tělíka. Nosnou veličinou o velikosti průtoku je akční zásah CTA regulátoru nebo vyvážení můstku.

Nejčastěji se používá zapojení ve Wheatsnově můstku, toto zapojení je v rovnováze, když platí $\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{RH}$. Rozvážení můstku je vyhodnocováno operačním zesilovačem, výstup zesilovače potom reaguje na napětí na můstku a tím kompenzuje ochlazování senzoru. Tento typ zapojení neprovádí kompenzaci vlivu teploty media, tuto kompenzaci je nutné dopočítávat později.



Obr. 9 schéma CTA zapojení bez kompenzace vlivu teploty[10]

Pro kompenzaci vlivu teploty media přidáme do zapojení snímač teploty media R_s . Pro nastavování požadovaného rozdílu teploty media a teploty žhavicího tělíska slouží nastavitelný odpor R_c , tento odpor slouží k nastavení přesné hodnoty a pro hrubé nastavení hodnoty potom jsou v zapojení odpory R_1 a R_2 .



Obr. 10 schéma CTA zapojení s kompenzací vlivu teploty[10]

8. Přehled použitých snímačů a zařízení

Pro naměření a vyhodnocení dat jsem použil celou řadu snímačů. Jednotlivé snímače jsem zvolil na základě jejich vlastností pro daný typ měření. Dokumentace k jednotlivým snímačům je uvedena v přílohách. V následující části jsem uvedl seznam použitých přístrojů a jejich nejdůležitější parametry:

TERMO-ANEMOMETR P1K0/50

Jedná se o termoanemometr s platinovými snímači umístěnými do kovového pouzdra. Snímač přichází do přímého kontaktu s médiem. Pro připojení do měřicí trasy je použit externí držák se šroubením.

Vzorec pro výpočet teploty z odporu snímače P1K0/50[11]:

$$t = \frac{\frac{R_t - 1}{R_0}}{TCR} \quad \text{Rov.11}$$

t	<i>teplota</i>	$[^{\circ}C]$
R_t	<i>odpor za teploty t</i>	$[\Omega]$
R_0	<i>odpor za teploty 0</i>	$[\Omega]$
TCR	<i>teplotní součinitel odporu</i>	$[\Omega \cdot K^{-1}]$

$TCR = 0,00385$

CTA deska IST_flow_demo_boar_2_3

Pro měření v CTA zapojení je potřeba k snímači připojit vyhodnocovací zařízení, v tomto případě se jedná o zapojení IST_flow_demo_boar_2_3. Toto zapojení je vyráběno přímo pro tento typ snímače firmou IST. Princip vyhodnocování je popsán v kapitole 6.2. a výrobce pouze přidal možnost nastavování různých rozdílů teploty media a žhavicího drátku. Na desce se potom nachází grafický display pro signalizaci aktuálního průtoku (jedná se pouze o orientační hodnotu).[12]

Multimetr UNI-T UT804

Pro vyhodnocování byl použit Multimetr UNI-T UT804. Tento multimetr jsem zvolil na základě přesnosti měření všech sledovaných parametrů. Parametry snímače jsou uvedeny v příloze.[13]

Snímač TR 011

Jedná se o referenční snímač teploty media ke snímači P1K0/50. Pro tento snímač platí speciální pravidla pro jeho umístění do měřicí trasy, snímač musí být umístěn pod úhlem 90° k proudícímu mediu.

Pro výpočet teploty media platí stejný vzorec jako pro výpočet teploty pomocí snímače P1K0/50. Proto je možné ho použít jako referenční snímač pro měření teploty media.[14]

OMEGA LSC 7000-100

Jedná se o snímač hmotnosti pro absolutní měření průtoku OMEGA LSC 700-100, rozsah do 100 lb, tzn. 45 kg. Samotná váha obsahuje pouze tenzometrický odporový most, most proto musí být napájen z externího stabilizovaného zdroje. Výstup z váhy je přiveden do zesilovače, který zesiluje výstupní napětí z tenzometrického mostu a následně je signál zpracován měřicí kartou a poslán do PC.[15]

Základní parametry váhy dle výrobce:

Linearita: 0,01%

Hystereze: 0,02%

Maximální napájecí napětí je 15 V.

Měřicí karta NI USB-6008

Pro automatizaci měření byla použita měřicí karta NI USB-6008, tato karta je součástí měřicí trasy pro automatizované měření průtoku media. Signál z hmotnostního snímače průtoku (váha) je zesílen pomocí zesilovače a odeslán pomocí měřicí karty do PC tam se zpracován pomocí obslužného programu, výsledek se považují za hodnotu referenčního průtoku. Tento program je součástí laboratorní úlohy s tématem „měření průtoku kapalin“.[16]

Čerpadlo

Oběh vody je zajištěn čerpadlem Grundfos UPS 32-55 180, toto čerpadlo má tři polohy, přičemž je po celou dobu nastaveno v poloze dvě. Za samotným čerpadlem je umístěna dvojice ventilů, kterými se dá nastavovat průtok měřicí trasou, přebytečná voda se potom vrací do spodní nádrže. Tato nádrž slouží jako zásobárna vody pro čerpadlo. Jak čerpadlo tak nádrž jsou umístěny ve spodní části měřicí trasy.[17]

Zesilovač

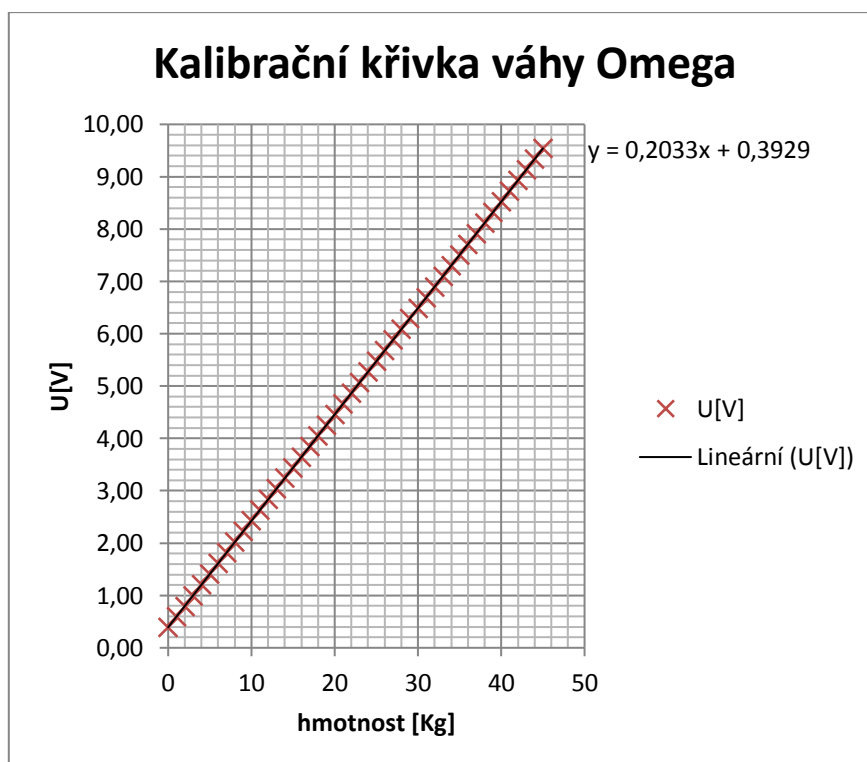
Zesilovač sloužící pro zesílení signálu z váhy. Zesílení je určeno vůči výstupu tenzometrického tedy 1mV/V. Napájení zesilovače je 15 V.[18]

9. Praktické měření a vyhodnocení výsledků

Tato část práce se zabývá podrobným proměřením vlastností anemometrického snímače P1K0/50 ve dvou pracovních zapojeních s konstantním proudem a s konstantním rozdílem teplot. Cílem měření je získání matematického modelu snímače a porovnání CCA a CTA metody.

9.1. Proměření referenčního snímače průtoku

Před samotným měřením bylo nutné provést kontrolní proměření referenčního čidla průtoku (váhy). Váha se v celé práci používá jako referenční snímač průtoku, a proto je nezbytné ověřit její vlastnosti.



Graf. 1 Kalibrační křivka váhy Omega

Z grafu je patrná lineární závislost výstupu váhy na hmotnostní zátěži. Pro ověření závislosti jsem vypočetl linearitu pro jednotlivé body:

pro nulové zatížení (váha je zatížena pouze svým krytem) je chyba nelinearity rovna 0,038 %. Pro další zatížení váhy je nejhorší výsledek nelinearity 0,015 %.

Z dokumentace víme, že linearita váhy Omega LSC 700-100 je 0,01 %, z tohoto poznatku můžeme stanovit, že hmotnostní váhu můžeme použít jako referenční snímač hmotnostního průtoku.

9.1.1. Nejistota měření napětí při hmotnostní průtoku

Nejistotu typu A pro toto měření považuji za nulovou.

Vážní čidlo

Chyby nelinearity vážního čidla je 0,01%

Chyby nelinearity vztažená k měřené hodnotě napětí 8 V je 0,0008V

$$u_{B1} = \frac{\Delta_{z1 \max}}{\chi} = \frac{0,0008}{\sqrt{3}} = 4,6188 * 10^{-4}V$$

Hystereze 0,02%

$$u_{B2} = \frac{\Delta_{z2 \max}}{\chi} = \frac{0,0002}{\sqrt{3}} = 1,1547 * 10^{-4}V$$

Vliv zesilovače

Maximální zvlnění je 5mV

$$u_{B3} = \frac{\Delta_{z3 \max}}{\chi} = \frac{0,005}{\sqrt{3}} = 2,8868 * 10^{-3}V$$

Vliv teplotního koeficientu zesilovače

Vliv teploty na zesilovač je max 100 ppm/K tato chyba narůstá s rostoucím výstupním napětím zesilovače. Abych uvažoval všechny možné teploty během měření musím uvažovat změnu teploty ± 4 oC. Pro tento uvažovaný rozptyl to znamená maximální změnu 4mV.

$$u_{B4} = \frac{\Delta_{z4 \max}}{\chi} = \frac{0,004}{\sqrt{3}} = 2,3094 * 10^{-3}V$$

Celková nejistota typu B pro měření napětí:

$$u_B = \sqrt{u_{B1}^2 + u_{B2}^2 + u_{B3}^2 + u_{B4}^2} = 3,7274 * 10^{-3}V$$

Určení kombinované nejistoty pro měření napětí

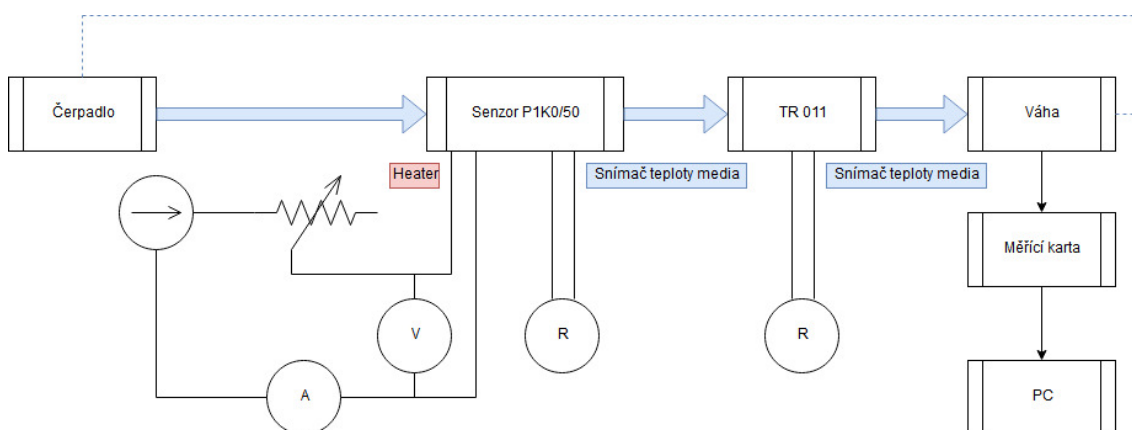
$$u_c = \sqrt{u_a^2 + u_B^2} = 3,7274 * 10^{-3}V$$

Pomocí naměřené konstanty referenčního snímače průtoku a nejistoty měřeného napětí lze určit měřenou nejistotu hmotnosti na referenčním snímači:

$$\Delta m_m = u_c * 0,2033 = 3,7274 * 10^{-3} * 0,2033 = \pm 7,5778 * 10^{-4}Kg$$

9.2. Schéma CCA zapojení

CCA zapojení je napájeno konstantním zdrojem proudu. Zdroj proudu je vytvořen ze zdroje napětí a přes odpor je připojen k žhavicímu drátku snímače P1K0/50. Na žhavicím drátku snímače P1K0/50 je pomocí čtyř vodičového zapojení měřeno napětí a proud. Pomocí multimetrů je potom snímán odpor na snímači TR 011 a na senzoru teploty media snímače P1K0/50.



Obr. 11 schéma měřicí trasy pro CCA

9.3. Odvození vzorců pro výpočet CCA zapojení

Pro určení parametru A nastavíme nulový průtok media. Pomocí zvyšování hodnot proudu dojde k růstu rozdílu teploty mezi žhavicím drátkem a senzorem teploty media. Z takto naměřených hodnot určíme směrnicí parametru A. Tento předpoklad můžeme stanovit na základě upravené rovnice 12, pro stanovení parametru A totiž platí že $v = 0$ m/s⁻¹ s toho plyne že $B = 0$:

$$P_h = R_h * I_h^2 = (A + B * Q_m^{0,5}) * \Delta T \quad \text{Rov.12}$$

P_h	výkon na žhavicím drátku	[W]
A	parametr A	[W K ⁻¹]
B	parametr B	[W s ^{0,5} K ⁻¹ m ^{-0,5}]
Q_m	průtok media	[Kg*s ⁻¹]
ΔT	rozdíl teploty žhavicího drátku a snímače teploty	[oC]

$$P_h = A * \Delta T \quad \text{Rov.13}$$

P_h	výkon na žhavicím drátku	[W]
A	parametr A	[W K ⁻¹]
ΔT	rozdíl teploty žhavicího drátku a snímače teploty	[oC]

$$A = \frac{P_h}{\Delta T} \quad \text{Rov.14}$$

A	parametr A	[W K ⁻¹]
P_h	výkon na he žhavicím drátku	[W]
ΔT	rozdíl teploty žhavicího drátku a snímače teploty	[oC]

Parametr B je potom matematicky dopočítán jako ideální parametr pro daný průtok. Hodnoty parametru B jsou posléze průměrovány a je určen jeden konstantní parametr B. Pro stanovení parametru B potom platí rovnice:

$$B = \frac{P_h - A}{Q_m^{0,5}}$$

Rov.15

B	<i>parametr B</i>	$[W s^{0,5} K^{-1} m^{-0,5}]$
P_h	<i>výkon na žhavicím drátku</i>	$[W]$
ΔT	<i>rozdíl teploty žhavicího drátku a snímače teploty</i>	$[oC]$
A	<i>parametr A</i>	$[W K^{-1}]$
Q_m	<i>průtok media</i>	$[Kg*s^{-1}]$

Pro výpočet rychlosti je potom nutné rovnici upravit:

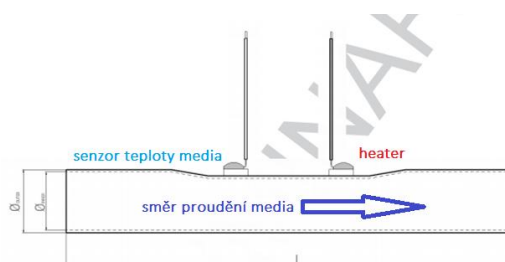
$$Q_m = \left(\frac{R_h I_h^2 - A}{B} \right)^2$$

Rov.16

B	<i>parametr B</i>	$[W s^{0,5} K^{-1} m^{-0,5}]$
P_h	<i>výkon na žhavicím drátku</i>	$[W]$
ΔT	<i>rozdíl teploty žhavicího drátku a snímače teploty</i>	$[oC]$
A	<i>parametr A</i>	$[W K^{-1}]$
Q_m	<i>průtok media</i>	$[Kg*s^{-1}]$

9.4. Určení konstant matematického modelu

Měření má za cíl ověřit chování snímače P1K0/50 v CCA zapojení, naměřit parametry A a B a z nich stanovit matematický model snímače. Ověřit teoretickou možnost použití referenčního snímače pro výpočet matematického modelu.

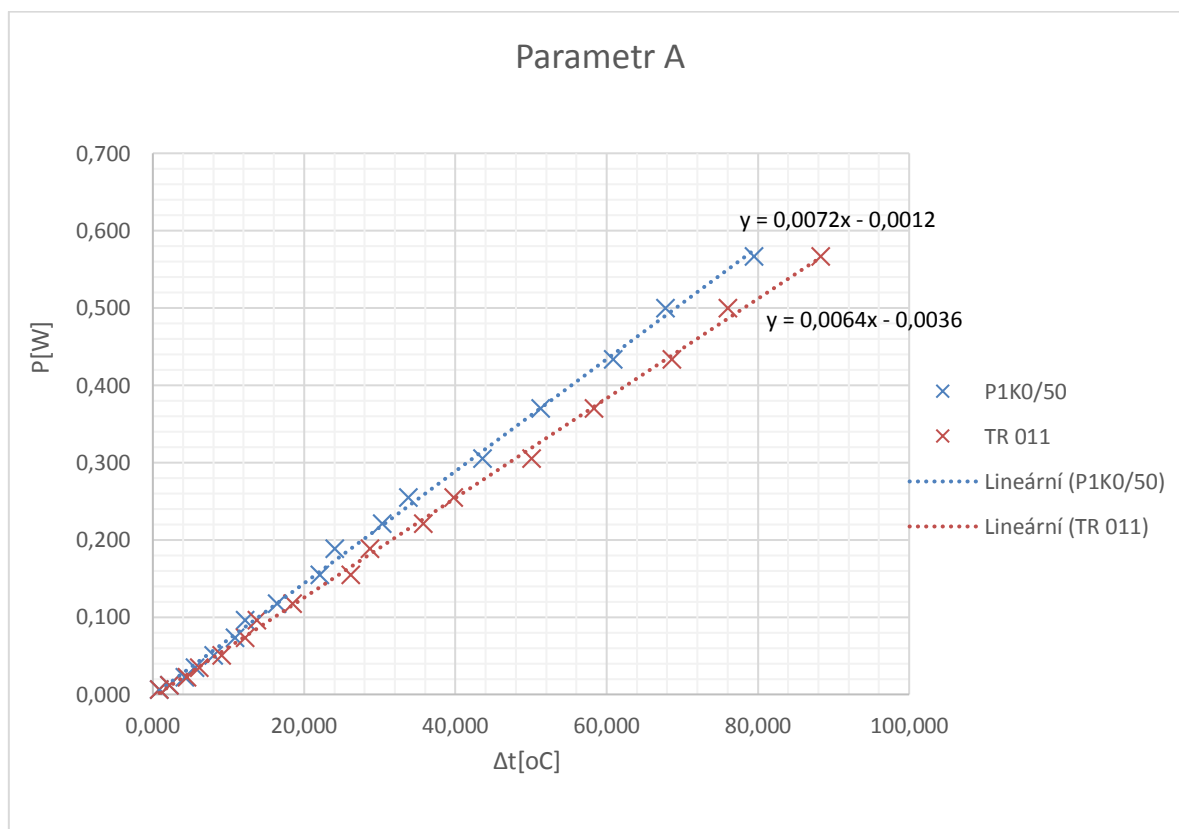


Obr. 12 Schématické zapojení snímače P1K0/50 ve směru proudění

Parametry měření

Proud obvodem : $I = 60,1 \text{ mA}$

Teplota media : $t = 21,818 \text{ }^\circ\text{C}$



Graf. 2 Parametr A pro sestavení matematického modelu

Naměřená data: vypocet_parametru_A_ve_spravnem_směru.xlsx viz. přílohy

Parametr A je stanoven jako výkon na žhavicím drátku dělen rozdílem teploty. Rozdíl teploty se určí jako rozdíl teploty žhavicího drátku oproti teplotě senzoru media, popřípadě teploty externího snímače teploty media. Výsledkem měření jsou tedy dvě konstanty A.

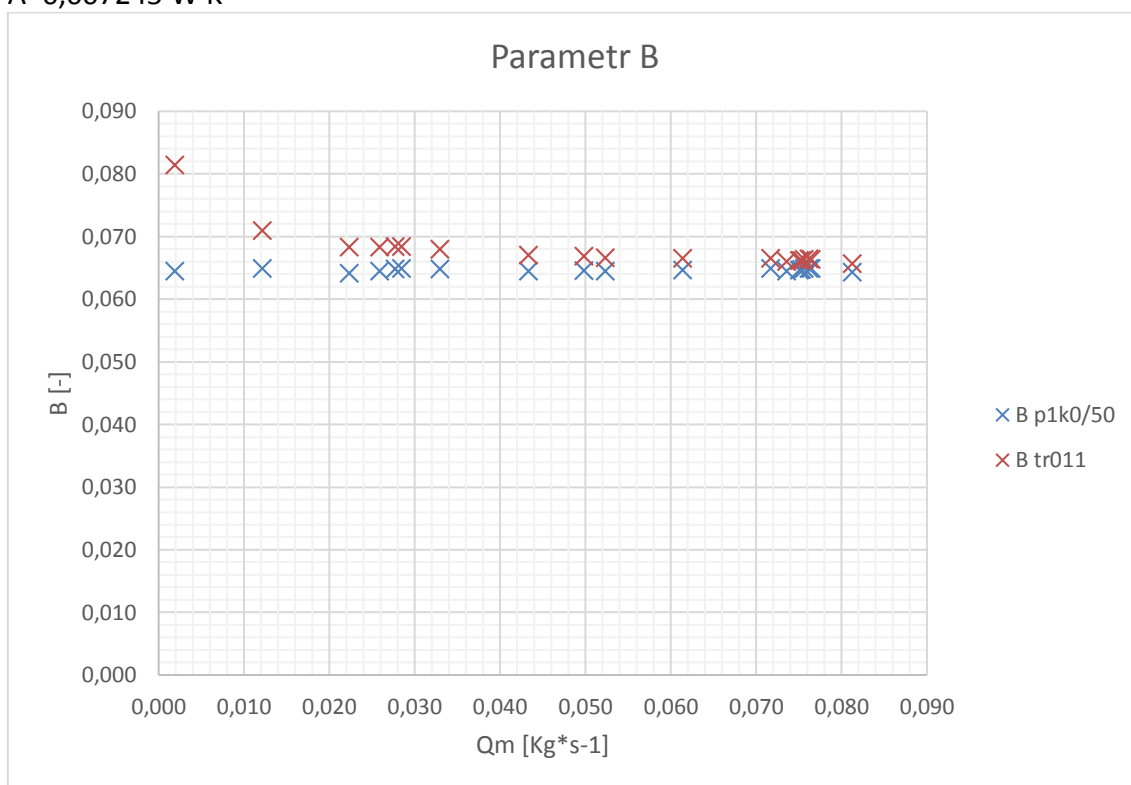
Jelikož je senzor teploty media během měření zahříván dochází ke změně rozdílu teploty. Žhavený drátek potom už neměří teplotu media což má za následek změnu parametru A.

Při využití externího snímače teploty TR 011 (externí měření teploty)

$A=0,006442 \text{ W K}^{-1}$

Při využití vyhřívaného drátku (interní měření teploty)

$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$



Graf. 3 parametr B pro určení matematického modelu

Naměřená data: vypocet_parametru_B_ve_správném zapojení.xlsx viz. přílohy

Parametr B je potom počítán jako ideální parametr pomocí rovnice 20. Pro každý naměřený parametr A je vypočítán parametr B zvlášť. Takto získané hodnoty jsou vyneseny v grafu 3. Pro sestavení matematického modelu snímače jsem určil průměrný parametr B.

Parametry A a B pro CCA zapojení snímače P1K0/50:

Parametry matematického modelu při využití externího snímače teploty TR 011

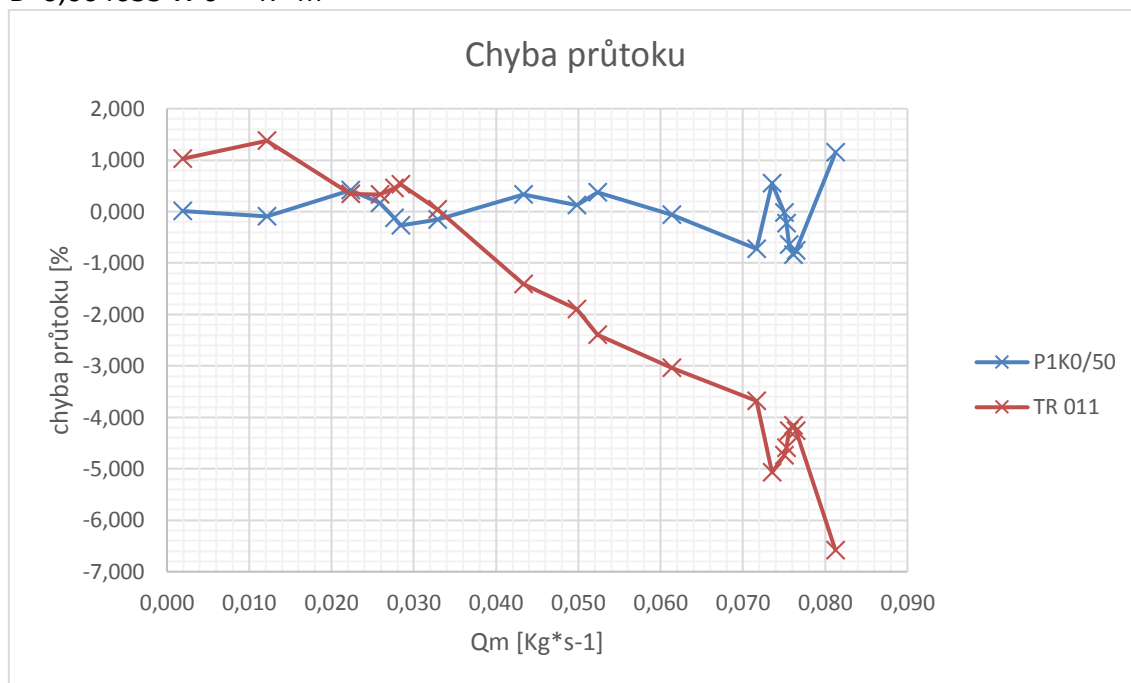
$$A=0,006442 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,067896 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$

Parametry matematického modelu při využití vyhřívaného drátku (interní měření teploty)

$$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$



Graf. 4 Chyba průtoku při sestavování matematického modelu

Naměřená data: vypocet_parametru_B_ve_správném zapojení.xlsx viz. přílohy

Závěr měření CCA zapojení ve správném směru

Po proměření snímače P1K0/50 jsem stanovil jeho matematické modely. Pomocí těchto modelů jsem zpětně stanovil průtok media, viz. rovnice 16, a porovnal ho s referenční hodnotou. Výslednou chybovost obou modelů jsem vynesl do grafu 4. Chybovost matematického modelu s P1K0/50 je ± 1 %.

Porovnáním výsledků je patrné že pro rostoucí průtok se zvyšuje chybovost modelu s Tr011. Tím že parametr B je počítán pomocí parametru A není možné jednoduše určit který z těchto parametrů může za tuto chybovost.

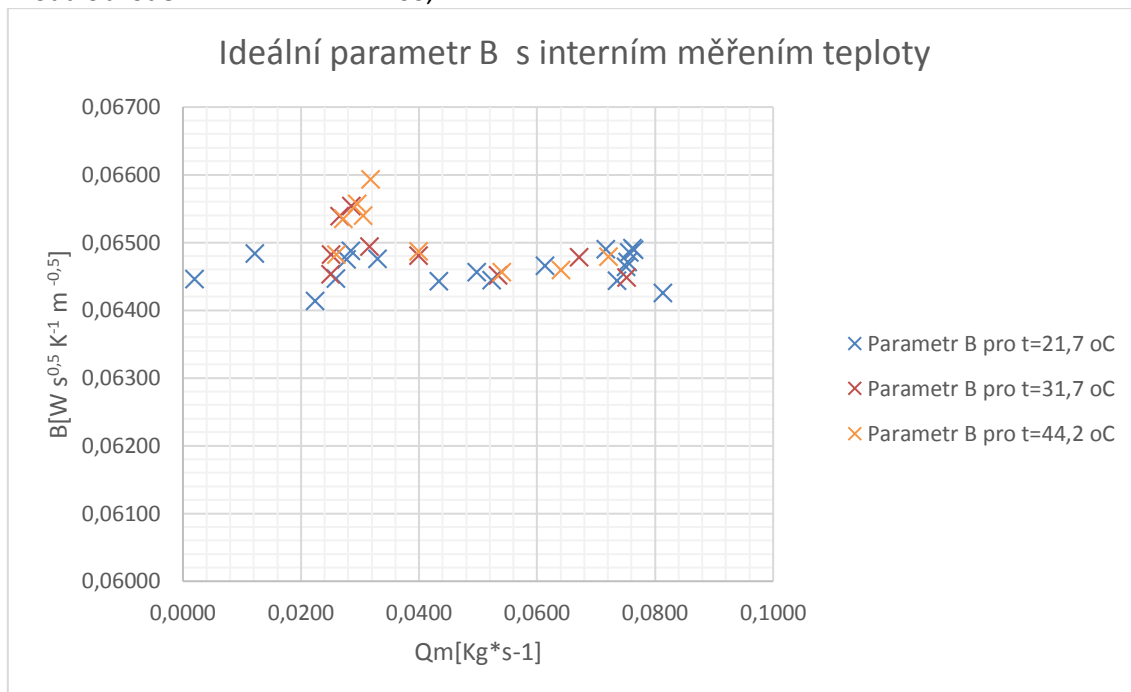
Rozkmit měřených hodnot pravděpodobně způsobilo příliš rychlé měření, kdy nedošlo k ustálení teploty na žhavicím drátku, a to mělo za následek špatný odečet napětí.

9.5. Ověření teplotní závislosti matematického modelu

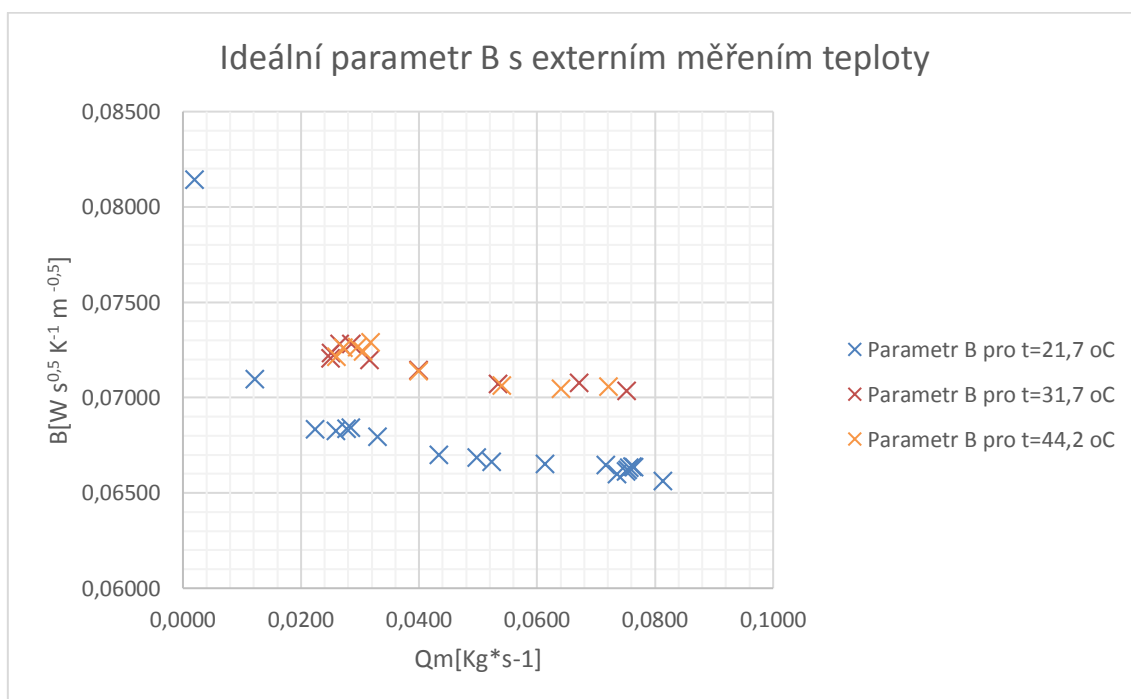
Vypočítaný matematický model musí být teplotně nezávislý. Z teorie víme že při navýšení teploty media dojde k navýšení teploty žhavicího drátku a tím ke změně rozdílu teploty. Zároveň je žhavicí drátek ochlazován teplejším mediem, a to vede ke změně jeho teploty.

Parametry měření

Proud obvodem : $I = 60,1 \text{ mA}$



Graf. 5 Parametr B pro různou teplotu media s interním měřením teploty



Graf. 6 Parametr B pro různou teplotu media s externím měřením teploty

Parametry A a B pro CCA zapojení snímače P1K0/50:

Parametry matematického modelu při využití externího snímače teploty TR 011

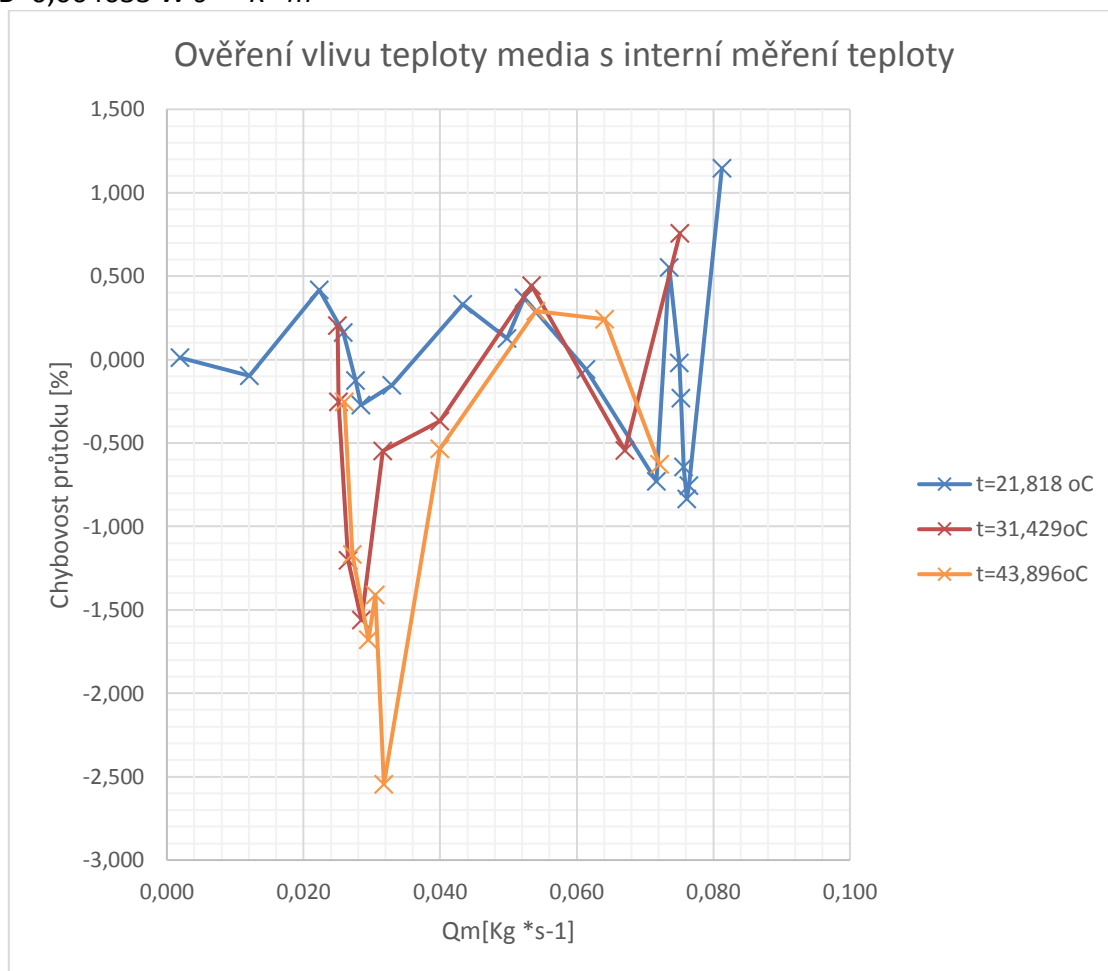
$$A=0,006442 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,067896 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$

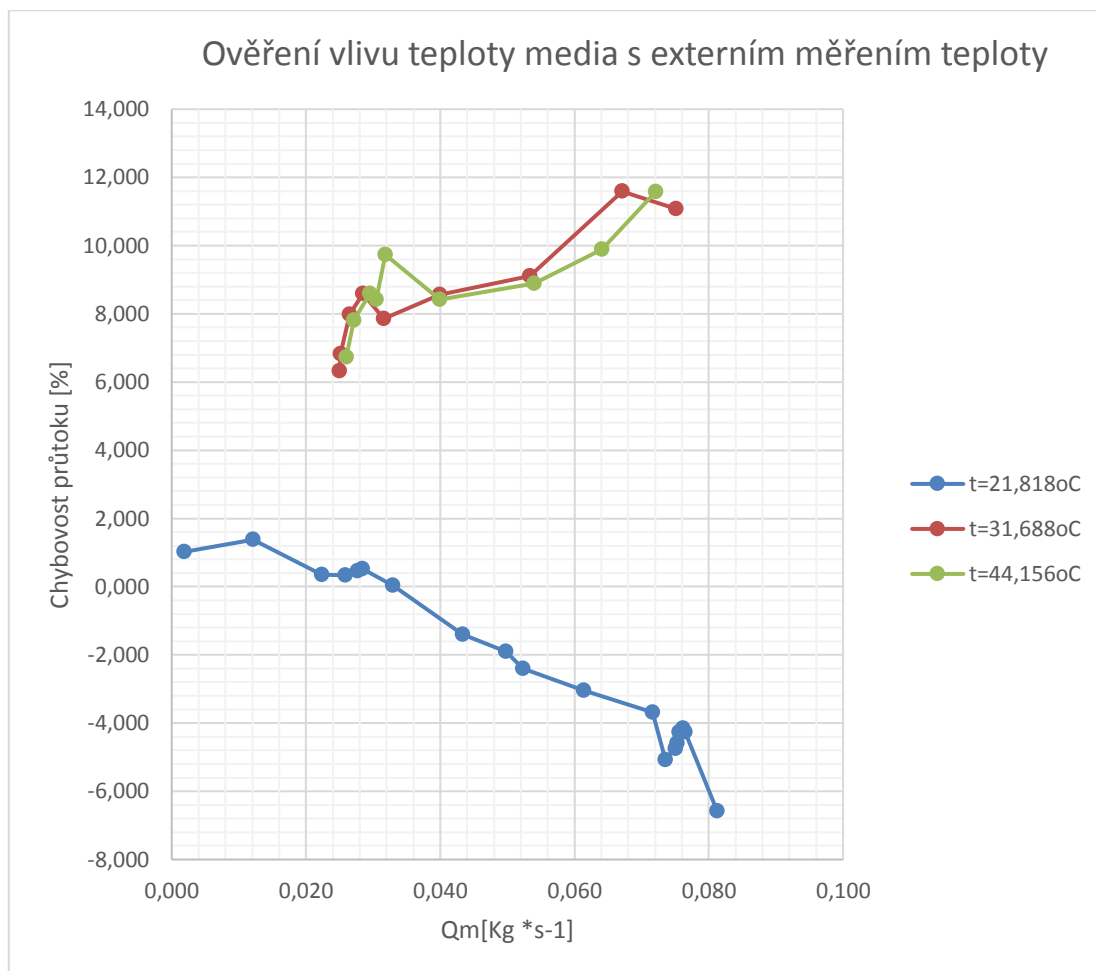
Parametry matematického modelu při využití vyhřívaného drátku (interní měření teploty)

$$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$



Graf. 7 Chybovost průtoku pro rozdílné teploty media



Graf. 8 Chybovost průtoku pro rozdílné teploty media s exter. měřením teploty

Naměřená data: vliv teploty.xlsx viz. přílohy

Závěr pro ověření teplotní závislosti snímače P1K0/50

Pro výpočet průtoku jsem použil parametry stanovené v kapitole 9.4. Do grafu 7 jsem vynesl výslednou chybovost průtoku pro tři teploty media. Pro snímání teploty media je použit žhavený drátek snímače P1K0/50. Z grafu je patrné že pro rostoucí teplotu media dochází ke zvýšení rozkmitu výsledných hodnot. Tento rozkmit lze vysvětlit dvěma způsoby:

- 1) Matematický model je teplotně závislý a při zvyšování teploty média nefunguje správně.
- 2) Při měření jsem zkrátil měřící čas, abych zajistil stejnou teplotu media během celého měření, a tím došlo k měření nepřesných hodnot.

Pro výpočet dat v grafu 8 jsem použil parametry získané pomocí retenčního snímače teploty media TR 011. Z grafu je patrné že tento matematický model nelze použít pro vyšší teplotu media. Referenční snímač tedy lze použít pouze pro referenční měření teploty a nelze pomocí něj vytvořit matematický model.

9.6. Ověření vlivu změny proudu na CCA zapojení snímače P1K0/50

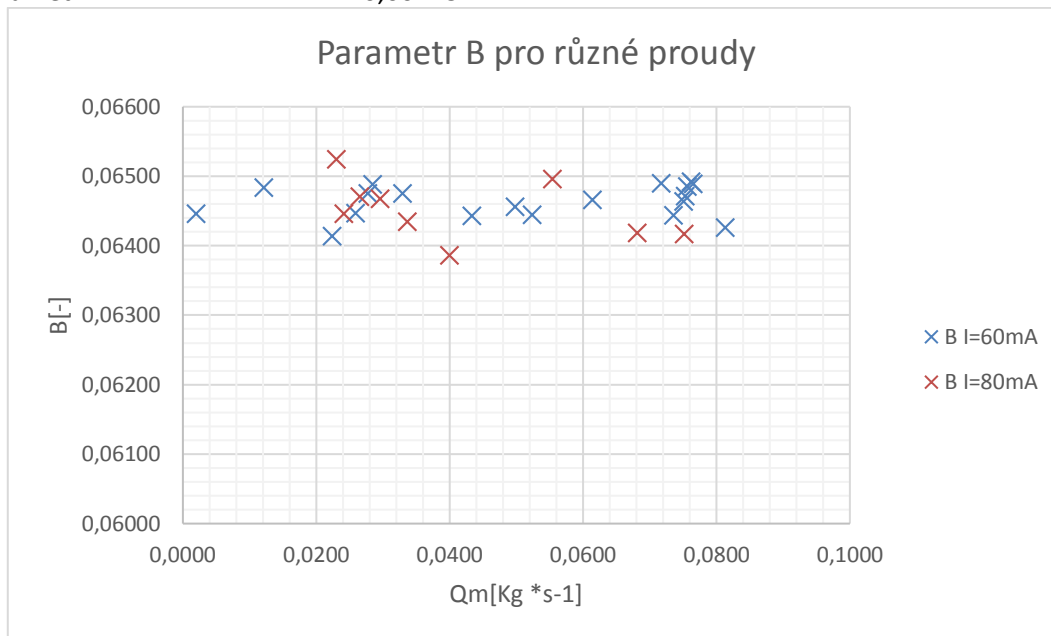
Pokud dojde ke zvýšení napájecího proudu, dojde zároveň k navýšení teploty žhavicího drátku. Toto navýšení teploty zvětší rozdíl mezi teplotou žhavicího drátku a teplotou media.

Parametry měření

Proud obvodem : $I = 60 \text{ mA}$, $I = 80,1 \text{ mA}$

Teplota media : $t = 31,2 \text{ }^\circ\text{C}$

Parametr A : $A = 0,00725$



Graf. 9 Parametr B pro různá proudová nastavení

Naměřená data: vliv proudu.xlsx viz. přílohy

Průměrné hodnoty parametru B:

$I = 60 \text{ mA} \implies B = 0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$

$I = 80 \text{ mA} \implies B = 0,064512 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$

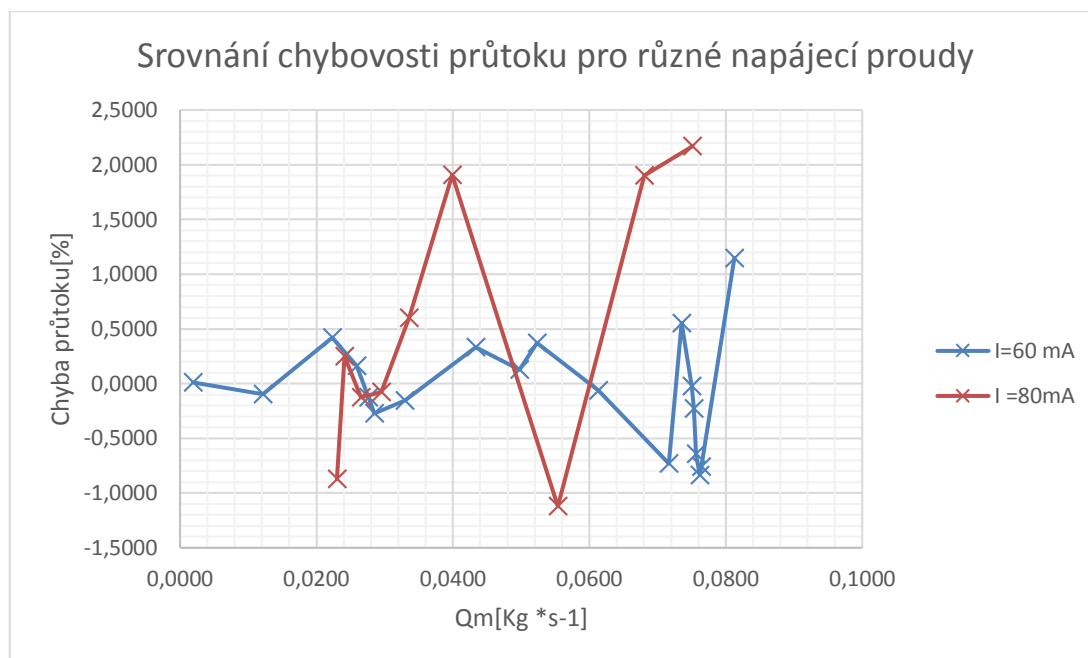
Rozkmit parametru B způsobila menší doba měření, kdy nedošlo k ustálení teploty na žhavicím drátku snímače P1K0/50. V grafu 9 srovnávám ideální hodnoty parametru B pro dva rozdílné proudy žhavicího drátku. Pro oba případy jsem použil parametr A získaný v kapitole 9.4. tedy $A = 0,00725$. Srovnáním průměrných parametrů B jsem došel k závěru, že je možné použít matematický model z kapitoly 9.4. i pro zvýšený napájecí proud.

Pro výpočet výsledné chybovosti je použit matematický model z kapitoly 9.4.

Parametry matematického modelu při využití vyhřívaného drátku (interní měření teploty)

$$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$



Graf. 10 Chybovost průtoku pro různá proudová nastavení

Naměřená data: vliv proudu.xlsx viz. přílohy

Závěr měření CCA zapojení se zvýšeným proudem

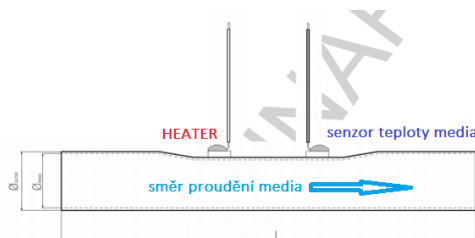
Potom co jsem ověřil že napájecí proud nemá vliv na parametr B jsem porovnal výslednou chybovost s chybovostí z kapitoly 9.4 a výsledek vynesl do grafu 10. Pro oba případy byl použit stejný matematický model.

Na grafu 10 je patrné že pro zvýšený proud se zvýšila chyba průtoku. Z grafického průběhu této chybovosti lze stanovit následující závěry:

- 1) Chyba průtoku kmitá kolem ustálené hodnoty, z toho lze usuzovat že se nejedná o chybu matematického modelu
- 2) Za zvýšenou chybovost pravděpodobně může zkrácená čas měření, nedošlo k ustálení teploty na snímači

9.7. Ověření vlastnosti CCA v opačném zapojení

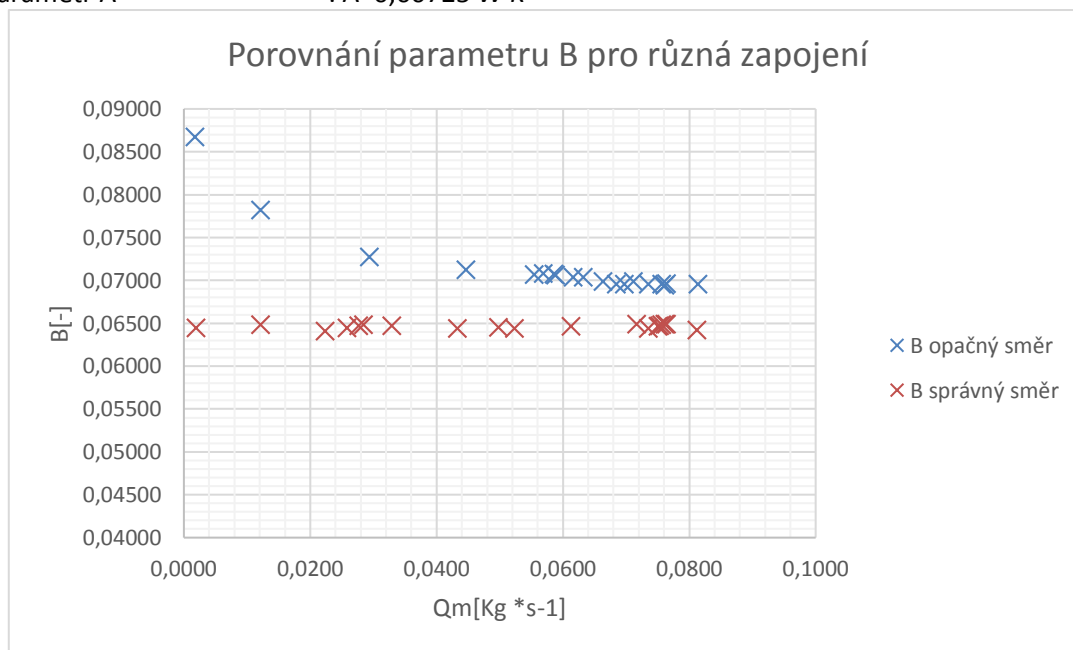
Z teorie o anemometrech víme že správné zapojení snímače je klíčové pro správné měření. Pokud je snímač otočený sensor teploty media neměří teplotu media. Jeho teplota je zvýšena žhavicím drátkem. Vliv žhavicího drátku se s rostoucím průtokem zmenšuje. Cílem měření je tedy zjistit, jestli z výstupních hodnot lze rozpoznat směr zapojení.



Obr. 13 Schématické zapojení snímače P1K0/50 v opačném směru

Parametry měření

Proud obvodem : $I = 60\text{mA}$
Teplota media : $t = 21,8\text{ }^\circ\text{C}$
Parametr A : $A = 0,00725\text{ W K}^{-1}$



Graf. 11 Parametr B v opačném směru CCA

Naměřená data: vliv zapojení.xlsx viz. přílohy

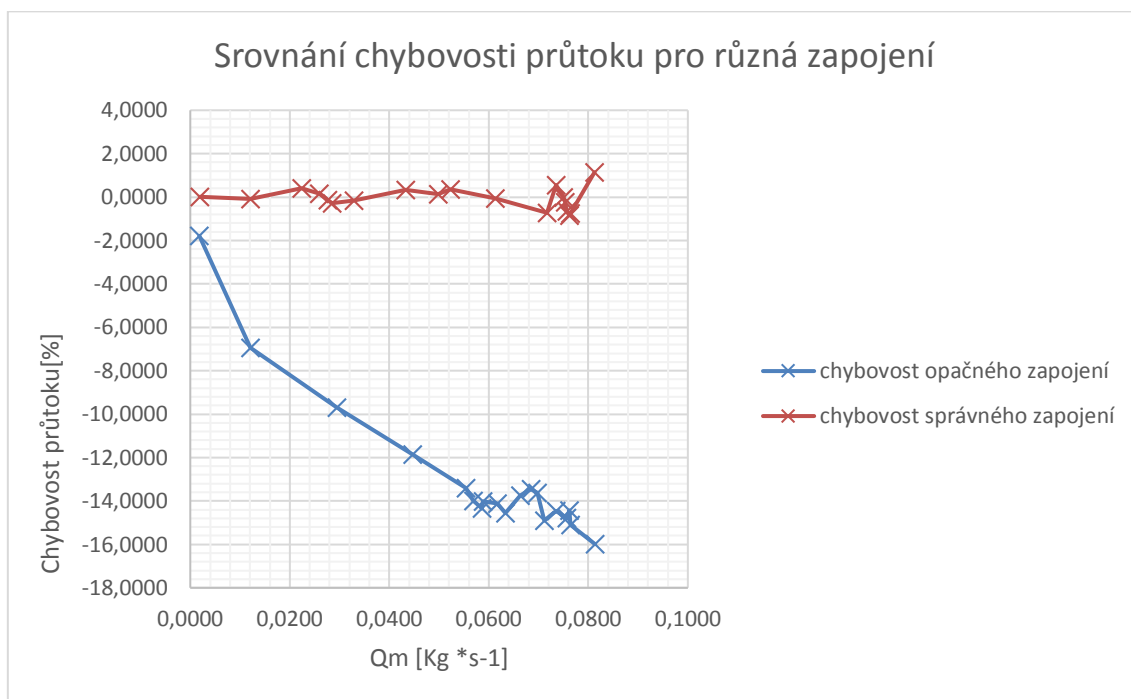
Z grafu 11 je patrné že parametr B v opačném směru dosahuje větších hodnot oproti parametru B ve správném směru. S rostoucím průtokem media dochází ke zmenšení vlivu žhavicího drátku na měření teploty, to vede k poklesu parametru B na hodnoty, které se blíží hodnotám dosaženým při měření ve správném směru zapojení.

Parametry A a B pro CCA zapojení snímače P1K0/50:

Parametry matematického modelu při využití vyhřívaného drátku (interní měření teploty)

$$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$



Graf. 12 Chybovost průtoku pro opačný směr CCA

Naměřená data: vliv zapojení.xlsx viz. přílohy

Závěr měření CCA zapojení v opačném směru

Při opačném zapojení snímače P1K0/50 dochází k měření zvýšené teploty media. Pokud na takto naměřená data použiji matematický model sestavený v kapitole 9.4. dojde k výraznému nárůstu chybovosti měření průtoku media. Z toho je patrné že matematický model navržený v kapitole 9.4. nelze použít, pokud není měřena správná teplota media.

Z naměřených hodnot potom lze rozpoznat kdy se jedná o zapojení v opačném směru. Informací o směru zapojení je odpor žhaveného drátku. Pokud dojde k výraznému navýšení jeho odporu při malých průtocích media je snímač zapojen obráceně

10. Výpočet nejistot měření snímače P1K0/50 v CCA zapojení

Jelikož je průtok media počítán podle rovnice 16, nelze použít standartní výpočet nejistoty a to z následujících důvodů.

-Parametr A je získán jako směrnice přímky a slouží přímo pro výpočet parametru B.

-Výsledný parametr B je potom získán jako průměr z vypočítaných hodnot.

Tento výpočet se tedy bude zabývat nejistotami jednotlivých naměřených dat a jejich vlivem na přesnost výsledného průtoku.

Pro parametry A a B platí hodnoty z kapitoly 9.4. Matematický model je považován za konstantní.

$$A=0,007245 \text{ W K}^{-1}$$

$$B=0,064633 \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$

Vycházím z rovnice pro průtok media:

$$Q_m = \left(\frac{\frac{R_h I_h^2}{\Delta T} - A}{B} \right)^2$$

Úprava rovnice na měřená data:

$$Q_m = \left(\frac{\frac{U_h I_h}{\frac{R_{50} - 1}{50} - \frac{R_{1000} - 1}{1000}} - A}{TCR} \right)^2$$

Nejistota vždy bude určena pro jednu veličinu, všechny ostatní budou považovány za konstantní.

Nejistota měření napětí pro u_{\max}

$$\Delta u = \Delta u_{\text{čtení}} + M * LSB = \frac{0,025}{100} * 3,6631 + 5 * 0,0001 = \pm 0,0014 \text{ V}$$

Dosažením Δu lze vypočítat odpovídající ΔQ_m :

$$\Delta Q_m = \pm 5,7684 * 10^{-6} \text{ Kg} * \text{s}^{-1}$$

Nejistota měření proudu I_{\max}

$$\Delta I = \Delta I_{\text{čtení}} + M * LSB = \frac{0,1}{100} * 0,081 + 0,06 * 0,0001 = \pm 0,087 \text{ mA}$$

Dosažením ΔI lze vypočítat odpovídající ΔQ_m :

$$\Delta Q_m = \pm 4,3984 * 10^{-4} \text{ Kg} * \text{s}^{-1}$$

Nejistota měření odporu R_{\max}

$$\Delta R = \Delta R_{\check{c}teni} + M * LSB = \frac{0,3}{100} * 1169 + 6000 * 0,0001 = \pm 4,107 \Omega$$

Dosažením ΔR lze vypočítat odpovídající ΔQ_m :

$$\Delta Q_m = \pm 4,0655 * 10^{-2} \text{ Kg} * \text{s}^{-1}$$

Ve všech předchozích případech byly parametry A a B konstantní. Parametr B je však určen jako střední hodnota z vypočtených dat. Z maximální odchylky těchto dat vůči střední hodnotě lze určit nejistotu parametru B:

Nejistota parametru B

$$\Delta B = \pm 4,9411 * 10^{-4} \text{ W s}^{0,5} \text{ K}^{-1} \text{ m}^{-0,5}$$

Dosažením ΔR lze vypočítat odpovídající ΔQ_m :

$$\Delta Q_m = \pm 2,8623 * 10^{-5} \text{ Kg} * \text{s}^{-1}$$

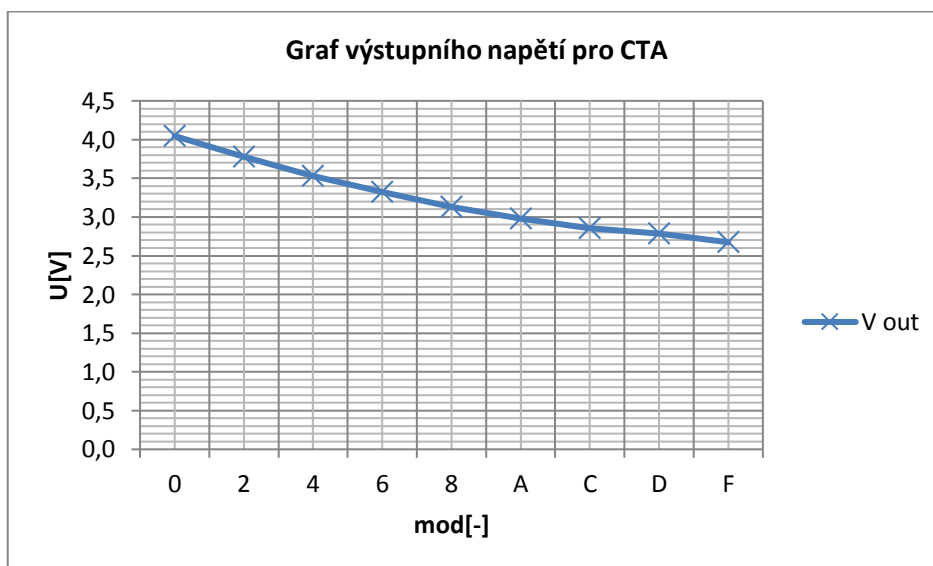
Z výše vypočtených nejistot lze určit že největší vliv na přesnost měření má měření odporu senzoru teploty media. S přesným měřením odporu senzorů je spojena ustalovací doba, zvolení správné délky této doby je klíčové pro přesné měření.

11. CTA zapojení snímače P1K0/50

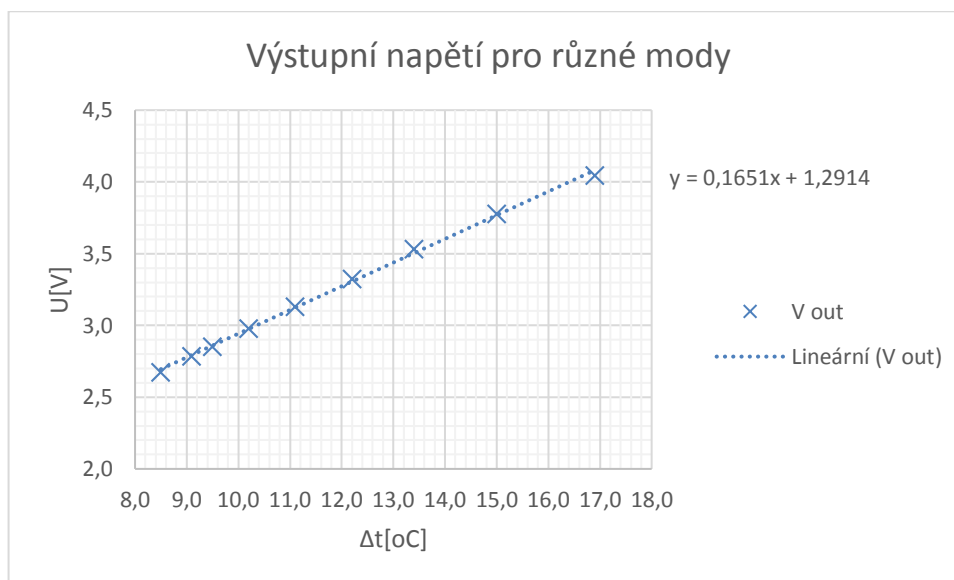
Pro CTA zapojení platí, že informaci o průtoku je výstupní napětí. Jednotlivé mody CTA zapojení udržují rozdílnou hodnotu Δt . Pro nulový průtok potom bude platit že čím větší je požadované Δt tím je potřeba větší energie k udržení tohoto rozdílu a tím bude větší výstupní napětí.

11.1. CTA zapojení – nulový průtok

Teplota media : $t = 23,4\text{ }^{\circ}\text{C}$



Graf. 13 Graf výstupního napětí pro CTA zapojení v různých modech



Graf. 14 závislost výstupního V na Δt , pro nulový průtok

Naměřená data: CTA zapojení s nulovým průtokem.xlsx viz. přílohy

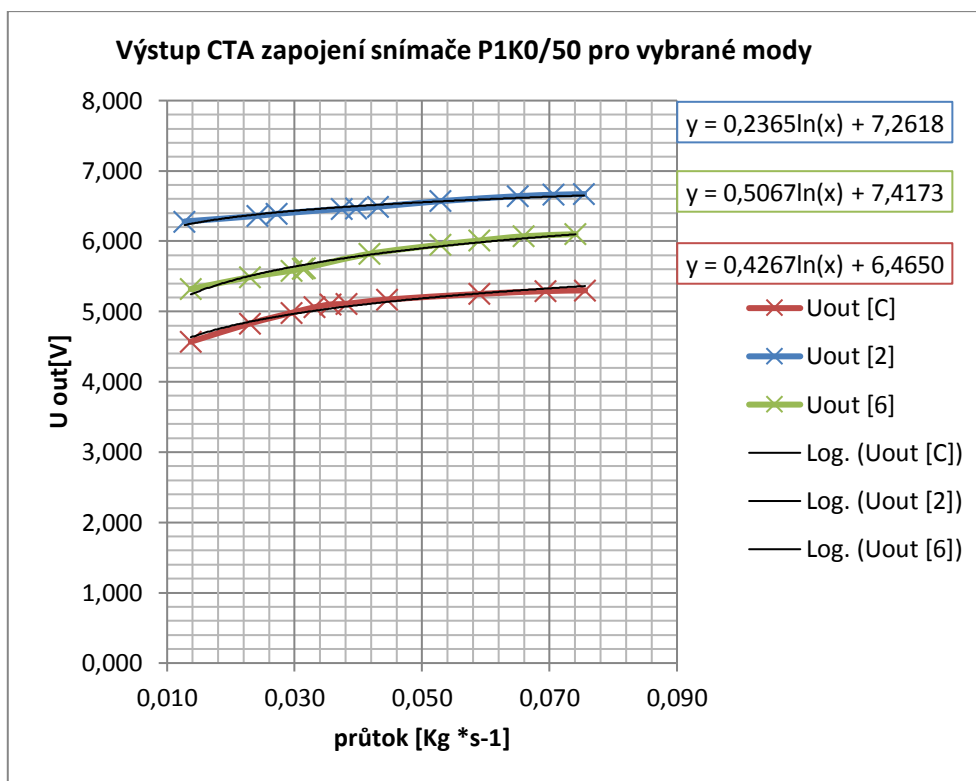
Výstupní napětí má lineární charakter v závislosti na požadovaném Δt . Při nastavování Δt je zapojení limitováno možnostmi desky IST_flow_demo_boar_2_3. Měřené body jsem volil tak abych pokryl celý tento rozsah.

11.2. Ověření výstupních charakteristik CTA zapojení

Obecně platí že pro CTA zapojení anemometru je nosnou informací o průtoku výstupní napětí, toto napětí odpovídá energii potřebné pro opětovné vyvážení můstku při daném Δt . Proto lze stavit následující předpoklady:

- Se zvyšujícím se průtokem bude potřeba větší energie k udržení Δt , proto bude na výstupu zapojení větší napětí
- S větším Δt bude větší výstupní napětí

Teplota media : $t = 21,3 \text{ }^\circ\text{C}$



Graf. 15 Výstupní napětí CTA zapojení pro různé průtoky

Naměřená data: CTA zapojeni s t_teplota okolí _ kopie.xlsx viz. přílohy

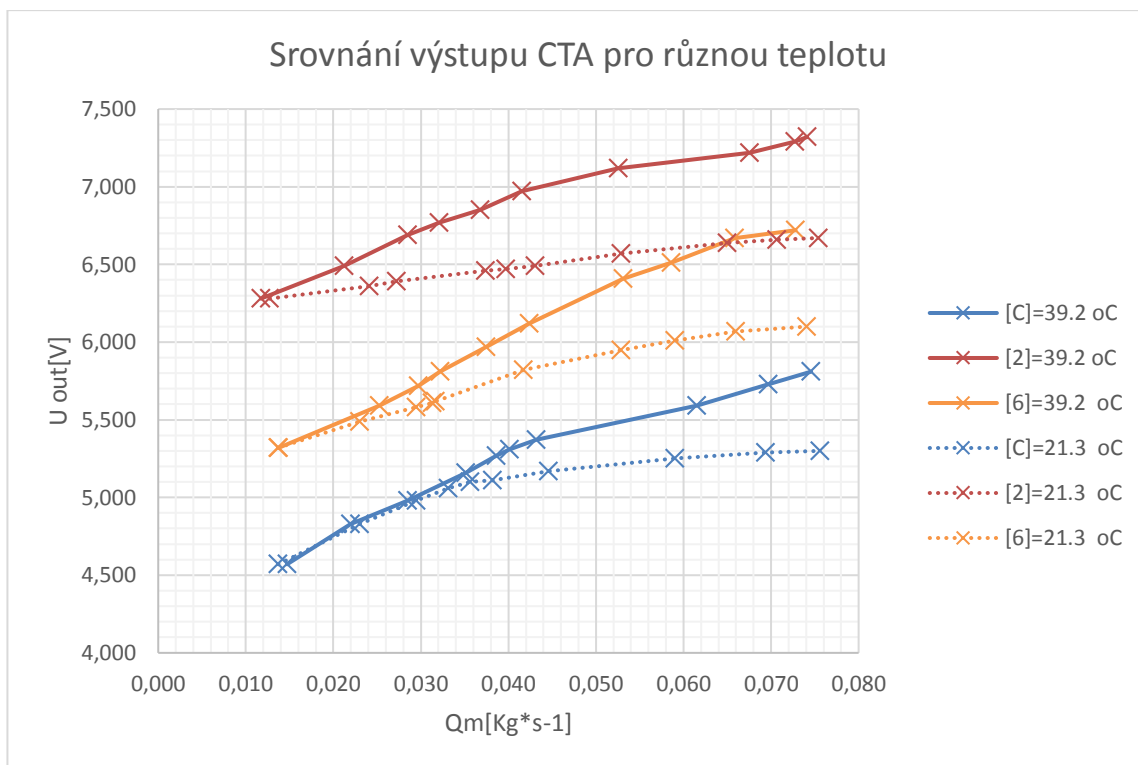
Pro sestavení matematického modelu snímače v CTA zapojení jsem proměřil tři výstupní charakteristiky. Mody jsem vybral tak aby reprezentovali celý rozsah teplotního nastavení. Z grafu 15 je patrné že se pro rostoucí průtok media se zvyšuje výstupní napětí. Trendy výstupního napětí pro jednotlivé mody nemají shodné konstanty, proto nelze sestavit jediný matematický model který by popisoval všechny mody CTA zapojení. Výstupní napětí má logaritmický trend což výrazně zkomplikuje sestavování matematického modelu.

11.3. CTA zapojení- ověření tep. závislosti výstupních charakteristik

Z teorie víme že CTA zapojení anemometru pracuje s konstantním rozdílem teplot, pokud tedy dojde k navýšení teploty media, musí se zvýšit i teplota žhavicího drátku, aby byl zachován požadovaný rozdíl teplot. Z tohoto poznatku lze stanovit že CTA zapojení je teplotně závislé a proto je nutné tuto závislost proměřit a stanovit vliv teploty na výstupní napětí.

Teplota media 1 : $t = 21,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Teplota media 2 : $t = 39,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Graf. 16 Srovnání výstupního napětí CTA pro různé teploty

Naměřená data: CTA srovnani teploty.xlsx viz. přílohy

Z grafu 16 je patná teplotní závislost výstupního napětí CTA zapojení. Tato závislost má exponenciální nárůst v závislosti na průtoku media. Z kapitoly 11.2. a 11.3. je tedy zřejmé že není možné sestavit jeden matematický model popisující CTA zapojení.

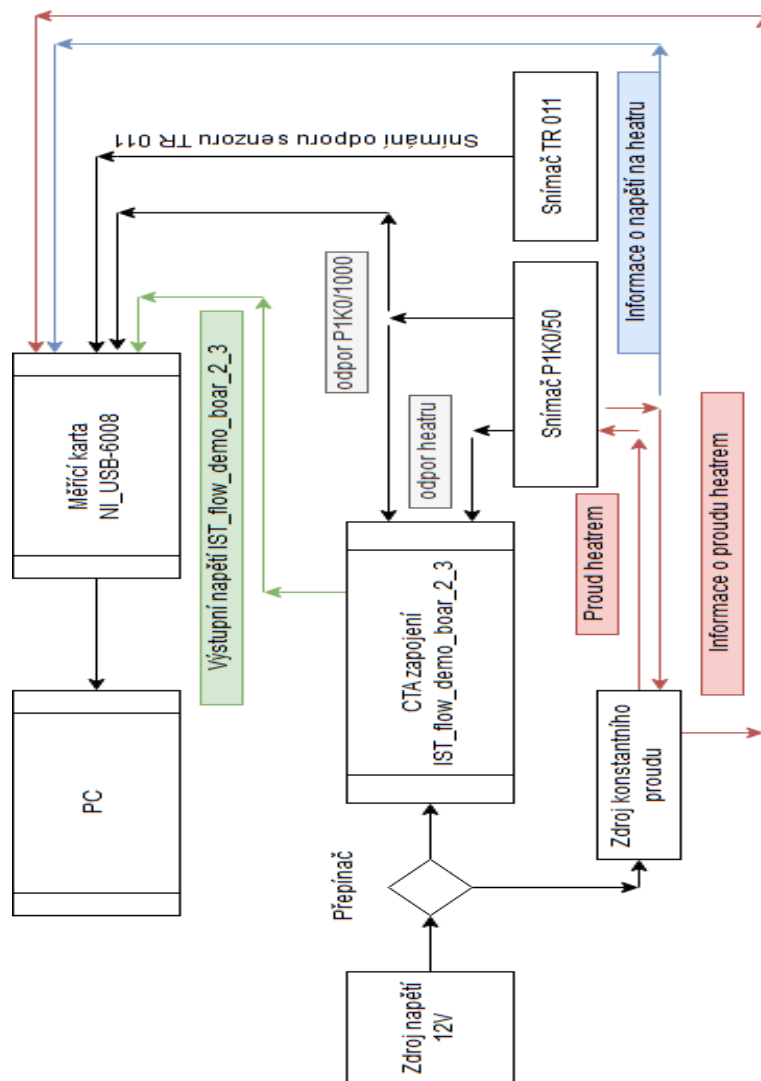
Matematický model by šlo sestavit pro každý mód zvlášť a zohlednit v něm konkrétní teplotní závislost daného modu.

12. Teoretický návrh automatické měřicí trasy

Pro návrh plně automatického měření pomocí snímače P1K0/50 jsou stanoveny následující podmínky:

- Návrh musí umožňovat měřit jak CCA zapojení tak CTA zapojení
- Pro vyhodnocení CTA zapojení je použita deska IST_flow_demo_boar_2_3
- Automatické vyhodnocení obstarává měřicí karta NI USB-6008
- Obslužný program je napsán v programovacím jazyce LabView
- Nikdy se nebudou měřit obě dvě metody naráz

Blokový diagram zapojení automatického měření:



Obr. 14 Blokové schéma kombinace zapojení CCA a CTA

Výpočet součástek pro proudový zdroj CCA zapojení:

Pro výpočet součástek lze vycházet z následujících poznatků:

- Proud CCA zapojení nesmí být větší než 100 mA
- Napájecí napětí má hodnotu 12 V, kvůli kompatibilitě s CTA zapojením
- Pro minimální teplotu žhavicího drátku platí že Δt musí být alespoň 5 °C

Za teplotu okolí považujeme teplotu 24 °C, proto teplota žhavicího drátku pro minimální proud je cca. 30 °C. Z této hodnoty lze stanovit:

$$t = \frac{\frac{R_t}{R_0} - 1}{RTR}$$

úpravou dostaneme

$$R_t = (t * RTR + 1) * R_0$$

$$R_{30} = (30 * 0,00385 + 1) * 50 = 55,775 \Omega$$

Z tabulky naměřených dat lze určit že tomuto odporu odpovídá proud 25 mA.

Proudový zdroj tedy musí pracovat s výstupním proudem 20-100 mA. Jelikož v zapojení se nachází 12V zdroj lze snadno vypočítat odpor potřebný pro vytvoření takového proudu z Ohmova zákona:

$$R_{20} = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,02} = 600 \Omega$$

$$R_{100} = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,1} = 120 \Omega$$

A výkon na odporu bude:

$$P_{20} = U * I = 12 * 0,02 = 0,24 W$$

$$P_{100} = U * I = 12 * 0,1 = 1,2 W$$

Z důvodu lepšího nastavování odporu lze použít dva odpory místo jednoho. Pevný odpor 120 Ω a k němu nastavitelný 500 Ω pro nastavení požadovaného proudu.

Odpory dostupné např. na:

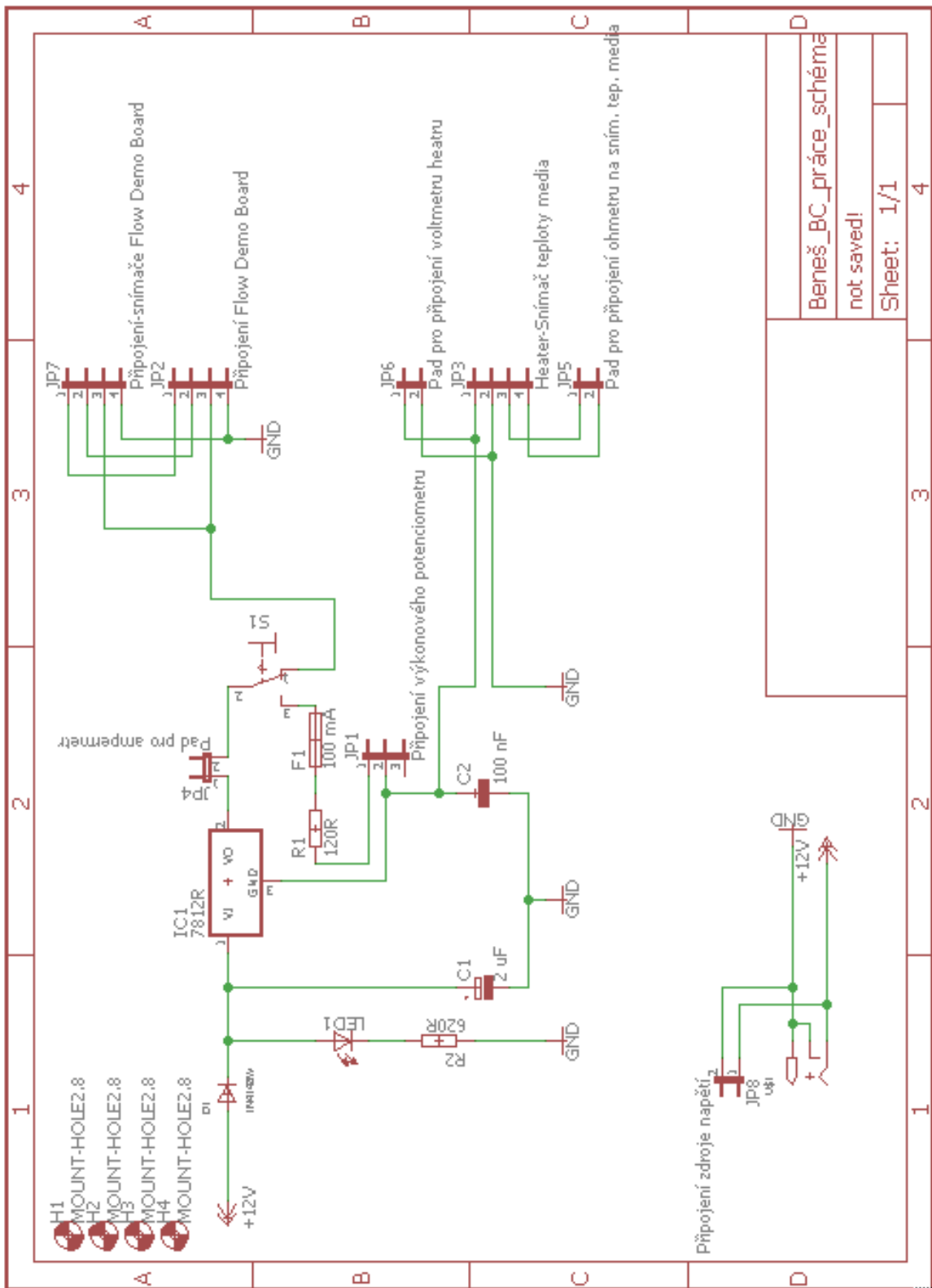
<https://www.gme.cz/pc4we500>

<https://www.gme.cz/rmo-120r-5w-5>

Výpočet odporu pro diodu:

$$R_{diode} = \frac{U}{I} = \frac{12}{0,02} = 600 \Omega$$

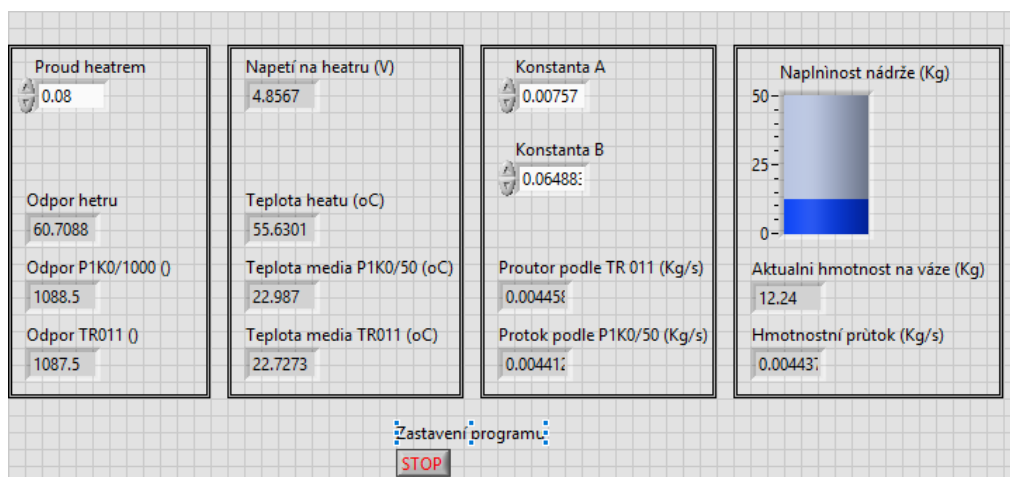
Schéma zapojení desky pro CCA a CTA zapojení:



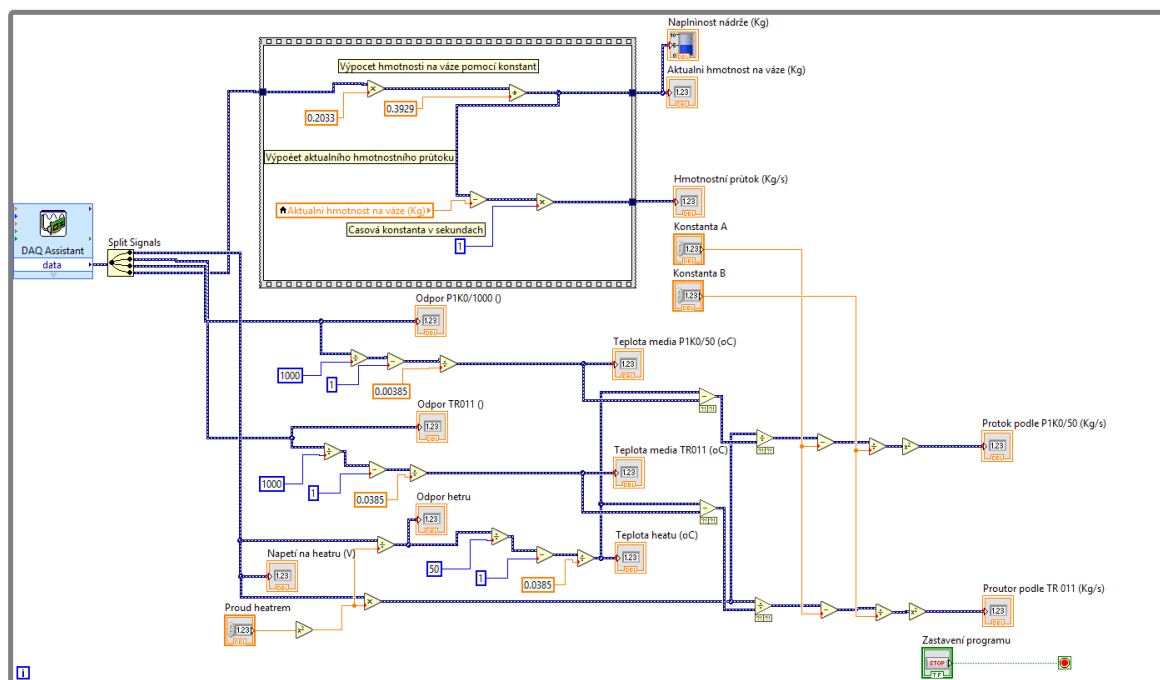
Obr. 15 Schéma kombinovaného obvodu CCA a CTA

13. Návrh poloautomatického měření v LabView

Program LabView umožňuje snadné vytvoření programu pro obsluhu měřících karet. Každý program v LabView se skládá z předního panelu viz. obrázek 17 a blokového programu viz. obrázek 18:



Obr. 17 Přední panel programu LabView



Obr. 18 Blokový diagram v programu LabView

Program má prokázat funkčnost parametru A a B získaných v kapitole 9.4. Z těchto parametru je vypočítán aktuální průtok media. Takto získaný průtok je potom porovnán z průtokem na váze. Koefficienty pro výpočet hmotnosti na váze jsou z kapitoly 9.1. Pro snímání hodnot byla použita měřící karta NI-USB 6008, tato karta je snímána pomocí DAQ_Assistant. DAQ_Assistant má nastavené čtyři měřící kanály (napětí na váze, napětí na žhavicím drátku P1K0/50, odpor TR011 a odpor žhaveného drátku P1K0/50).

14. Závěr

Cílem práce bylo proměřit snímač P1K0/50 a ověřit jeho vlastnosti za různých podmínek, z takto získaných dat potom určit matematický model tohoto snímače. Snímač P1K0/0 je anemometrický snímač, a proto se pro sestavení jeho matematického modelu používá rov.9. V rovnici se nachází dva parametry A a B, tyto parametry slouží pro vyjádření přenosu tepla. Před sestavením matematického modelu bylo potřeba tedy určit tyto parametry.

Během celého měření byl v měřící soustavě umístěn referenční snímač TR 011, tento snímač sloužil pro referenční měření teploty media. Porovnáním výsledků ze snímačů P1K0/50 a TR011 je patrné že snímač TR011 nelze použít pro sestavení matematického modelu. Výsledné hodnoty pro sestavení matematického modelu byly získány ze snímače P1K0/50.

Pro určení parametru A jsem využil poznatku z rov.14, z této rovnice je patrné že pro nulový průtok je všechno teplo odevzdáváno pomocí přenosu tepla vedením. Tím že jsem do žhavicího drátku pouštěl různě velký proud jsem docílil odpovídajícím změnám teploty viz graf. 2. Proložení dat v grafu 2 jsem získal parametr A pro danou teplotu media.

Parametr B byl potom počítán jako ideální parametr pomocí rovnice 15. V grafu 3 jsem potom srovnal hodnoty parametru B pro interní a externí měření teploty. Z takto získaných parametrů jsem stanovil dva matematické modely snímače P1K0/50.

V kapitoly 9.5. jsem proměřil chování snímače za zvýšené teploty media. V grafu 7 jsem dokázal že je možné použít matematický model z kapitoly 9.4. pro libovolnou teplotu media. Matematický model snímače s externím snímáním teploty media se ukázal jako nepoužitelný a v dalších částech práce už není používán. Za jeho nefunkčnost pravděpodobně může parametr A. Úloha byla sestavena tak aby externí snímač nemohl být ovlivňován snímačem P1K0/50, toto uspořádání vedlo ke změně parametru A oproti internímu měření teploty media viz. graf 2.

Pro CCA zapojení je možnost zvolit napájecí proud snímačem. V kapitole 9.6. jsem proto ověřil platnost matematického modelu s kapitoly 9.4. pro zvýšený el. proud. Parametr A jsem použil z kapitoly 9.4. a stanovil parametr B pro zvýšený proud obvodem. Takto získaný parametr B jsem porovnal s parametrem B z kapitoly 9.4. viz. graf 9. Pro tyto matematické modely jsem ověřil chybovost průtoku media viz. graf 10. Z tohoto grafu lze vyvodit že matematický model z kapitoly 9.4. lze použít pro různé proudová nastavení. Pro zvýšený proud je nutné nechat delší čas na ustálení teploty na snímači.

Kapitola 9.7. se zabývá případným otočením snímače P1K0/50. Pro anemometrický princip je klíčové správné zapojení snímače. Z tohoto důvodu jsem ověřil chování snímače v otočeném směru proudění media. Z naměřených dat je patrné že snímač v takovém případě neměří správně. Z naměřených dat na žhaveném drátku ale lze poznat že došlo k otočení snímače. Z grafu 12 je patrné že s rostoucím průtokem narůstá chyba měření.

Výsledný matematický model snímače P1K0/50 je tedy nezávislý na teplotě media i na napájecím proudem.

$$P_h = R_h * I_h^2 = (0,007245 + 0,064633 * v^{0,5}) * \Delta T$$

CTA mód je druhý z modu ve kterých může snímač P1K0/50 pracovat. CTA mód je mód s konstantním rozdílem teplot mezi žhavicím a žhaveným drátkem. Pro měření v tomto modu jsem použil elektroniku od firmy IST, tato elektronika je přímo navržena pro snímač P1K0/50.

V kapitole 11.1. jsem ověřil teoretický předpoklad výstupu CTA zapojení. Stanovil jsem úroveň výstupního napětí pro jednotlivé mody, tyto mody odpovídají definovaným rozdílům teploty. V grafu 14 je vidět lineární závislost výstupního napětí na požadovaném rozdílu teplot.

V kapitole 11.2. jsem naměřil výstupní charakteristiky pro vybrané mody v závislosti na průtoku media. Výsledná charakteristika je určena pro každý mód zvlášť, tyto charakteristiky jsem vynesl do grafu 15. Z takto získaných dat nelze stanovit jeden matematický model pro celé CTA zapojení.

Kapitola 11.3. se potom zabývá ověřením teplotní závislosti CTA zapojení. Z naměřených dat v grafu 16 je jasně vidět teplotní závislost výstupu zapojení. Teplotní závislost se nejvíce projevuje pro vyšší průtoky media. Z takto naměřených dat nelze jednoduše sestavit matematický model pro CTA zapojení snímače P1K0/50.

V kapitole 12 jsem navrhoval externí elektroniku pro usnadnění měření snímače P1K0/50, tato elektronika slouží pro snadné přepínání modů CCA a CTA a zároveň umožňuje připojit měřící kartu pro automatizované měření v obou modech. Elektronika se skládá z části pro signalizaci připojení napájení, a ochraně před přepólování. Dále je v zapojení umístěn 12V stabilizátor jako napěťový zdroj pro CTA zapojení, pomocí výkonových odporů ho lze využít jako nastavitelný proudový zdroj pro CCA zapojení. V zapojení je také umístěn pad JP4 pro připojení ampérmetru, pokud není ampérmetr připojen je nutné přemostit tento pad.

V kapitole 13 jsem vytvořil malý program v prostředí LabView pro ověření reálného použití matematického modelu snímače P1K0/50 z kapitoly 9. Program byl navržen tak aby ukazoval aktuální hodnoty průtoku, aktualizované vždy po 1 s. Výsledným výstupem programu jsou tři hodnoty průtoku, hmotnostní průtok měřený na váze, průtok určený pomocí snímače teploty P1K0/50 a průtok určený pomocí snímače teploty TR 011. V měření pomocí programu v LabView se ukázala jedna podstatná chyba, a to velké kmitání měřených hodnot. Tento jev by mohl být odstraněn průměrováním hodnot v dostatečně velkém časovém úseku (např. hodnoty by se odečítaly každých 50 ms po dobu jedné sekundy a výsledkem by potom byla průměrná hodnota).

Výsledkem práce je tedy matematický model snímače P1K0/50 pro CCA zapojení. Tento model je možné použít za všech podmínek. Takto získaný matematický model je možné použít pro automatizované měření. Pro matematické model snímače P1K0/50 v CTA zapojení platí, že tento model je teplotně závislý, a proto není možné jednoduše sestavit matematický model snímače. Tento jev by šel vyřešit proměřením snímače ve všech pracovních modech za laboratorně stanovených podmínek (přesná teplota media), a potom z takto získaných dat určit chování matematického modelu při změně teploty media.

15. Zdroje

- [1] *Nejistota měření* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2014 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/06-nejistota-1417542574.pdf>
- [2] *Statické vlastnosti sensorů* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci, 2009 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/02a-terminologievim3-1287047120.pdf>
- [3] *Statické vlastnosti sensorů* [online]. Brno: FEKT VUT, 2002 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_1_3_1.htm
- [4] *Teplotní průtokoměry – termoanemometry* [online]. automatizace.hw.cz: Antonín Vojáček, 2006 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2006082301>
- [5] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky: principles and Signal Analysis*. 2 ed. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
- [6] *Kompaktní kalorimetrické průtokoměry* [online]. automatizace.hw.cz: Antonín Vojáček, 2007 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007021901>
- [7] *Tepelné hmotnostní průtokoměry a regulátory* [online]. Praha: ústav fyziky a měřicí techniky VŠCHT Praha, 2003 [cit. 2019-04-17]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/tepelne-hmotnostni-prutokomery-a-regulatory-2003_12_29006_599/
- [8] BRUUN, H.H. *Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press/, 1996. ISBN 01-985-6342-6.
- [9] Bejček Ludvík, Ďaďo Stanislav, Platil Antonín. *Měření průtoku a výšky hladiny 3. díl edice Senzory neelektrických veličin* [online]. 1rd edition. Praha: BEN - technická literatura, 2006 [cit. 2019-04-03]. ISBN 9780511471100. Dostupné z: <http://shop.ben.cz/cz/121218-mereni-prutoku-a-vysky-hladiny.aspx#download>
- [10] BRUUN, H.H. *Hot-Wire Anemometry: principles and Signal Analysis*. 2 ed. Oxford: Oxford University Press/, 1996. ISBN 01-985-6342-6.
- [11] *P1K0/050.232.2K.C.050.M.U.S* [online]. Ebnat-Kappel, Switzerland: Innovative Sensor Technology [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1860344.pdf>

- [12] *Flow Demo Board FS5/FS7, OOL* [online]. Ebnat-Kappel, Switzerland: Innovative Sensor Technology [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.ist-ag.com/sites/default/files/QSGF_Demo_Board_E.pdf
- [13] *UT804* [online]. Hu Men Town, China: Uni-Trend Technology, 2006 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/czn.722-337.1.pdf>
- [14] *TR 011* [online]. Rožnov: SENSIT, 2018 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://www.sensit.cz/cz/produkt/tr-011-br/-prumer-6-az-10-mm-50-c-az-200-c-21403-20668-781/>
- [15] *Low-Range Remote Platform Scales High, LSC7000-100* [online]. USA: Omega [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.omega.com/en-us/sensors-and-sensing-equipment/load-and-force/c/balances-and-scales>
- [16] *USB-6008 Multifunction I/O Device* [online]. Praha: National Instruments (Czech Republic), 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.ni.com/en-us/support/model.usb-6008.html>
- [17] *UPS 32-55 180* [online]. Bjerringbro: Grundfos, 2019 [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&lang=CSY&productnumber=95906409&qcid=544954980>
- [18] *In-Line Amplifier For strain gauge sensors Model 9235* [online]. Gernsbach: Burster [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: https://www.burster.com/fileadmin/user_upload/redaktion/Documents/Products/Data-Sheets/Section_9/9235_EN.pdf
- [--] C. BAKER, Roger. *Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications* [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. ISBN 9780511471100. Dostupné z: <https://www.cambridge.org/core/books/flow-measurement-handbook/5D42EDD07C801BA0E051BB9C68E82AFE>

Pozn. v příloze bakalářské práce jsou vloženy stažené návody ke všem používaným snímačům.

16. Přílohy

1. Datasheet - IST_flow_demo_boar_2_3 (stránky 4)
2. Datasheet – multimetr UNI-T UT804 (stránky 2)
3. Datasheet – snímač TR 011 (stránky 3)
4. Datasheet – váha OMEGA LSC 700-1000 (stránky 1)
5. Datasheet - Měřicí karta NI USB-6008 (stránky 26)
6. Datasheet - termo-anemometr P1K0/50 (stránky 2)
7. Datasheet – zesilovač BURSTER 9235 (stránky 2)
8. Schéma CCA a CTA desky (-----)
9. Navrch desky pro CCA a CTA zapojení (-----)
10. Seznam součástek pro desku CCA a CTA zapojení (stránky 1)
11. Naměřená data v excelu (-----)