



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU PRO  
TESTOVÁNÍ ÚČINNOSTI CHLADÍCÍCH KANÁLŮ**

DESIGN OF EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR TESTING OF COOLING CHANNELS EFECIENCY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Jan Jež**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.**

**BRNO 2018**



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Jan Jež</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Návrh experimentálního přípravku pro testování účinnosti chladících kanálů**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Cílem práce je navrhnout experimentální pracoviště pro testování účinnosti chladících kanálů. Náplní bude navrhnout experimentální přípravek, na kterém bude možná snadná modifikace parametrů chladícího kanálu. Tento přípravek bude osazen tepelnými čidly, zařízením pro měření množství chladícího média a topným tělesem. Dále bude třeba navrhnout komunikaci přes I/O kartu s PC pro všechny senzory a nastavení topného výkonu. Celý proces měření by měl být plně automatizován.

### **Cíle bakalářské práce:**

literární průzkum  
návrh koncepce experimentálního přípravku  
návrh elektroniky a její komunikace přes I/O kartu s PC  
ověření funkce na testovacím měření  
porovnání výsledků experimentu s výpočtem

### **Seznam doporučené literatury:**

DELČÍK, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.

HAK, J., OSLEJSEK, O.: Computed of Cooling of Electric Machines, 1. volume. VUES Brno 1973,CZ

ONDRUSKA, E., MALOUŠEK, A.: Ventilation and cooling of electric machines, SNTL Praha 1985

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí experimentálního zařízení pro měření účinnosti chladicích kanálů vyskytujících se v elektrických strojích. Zařízení měří součinitel přestupu tepla při turbulentním proudění vzduchu kanálem a součinitel tření v kanálu. Na základě těchto údajů lze usuzovat na účinnost chlazení kanálu dané konfigurace.

## **ABSTRACT**

This thesis describes design and construction of device which measures efficiency of cooling channels in electric machines. Device measures heat transfer coefficient and friction coefficient. Based on these data, the efficiency of cooling channels with different configuration can be determine.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

chlazení elektrických strojů, chladicí kanál, součinitel přestupu tepla, nucená konvekce

## **KEYWORDS**

cooling of electric machines, cooling channel, heat transfer coefficient, forced convection



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JEŽ, J. *Návrh experimentálního přípravku pro testování účinnosti chladících kanálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..



## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky a za vysvětlení teorie potřebné k ventilačním výpočtům v elektrických strojích. Dále děkuji Ing. Michalovi Bastlovi za poskytnutí konzultací při navrhování elektronické části zařízení.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Vlacha, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 25.5.2018

.....

Jan Jež



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>TEORETICKÝ ROZBOR</b> .....	<b>17</b>
3.1	Teorie k hydraulickým výpočtům .....	17
3.1.1	Reynoldsovo číslo .....	17
3.1.2	Odpory proudění .....	17
3.1.3	Součinitel tření v kanálu.....	18
3.1.4	Drsnost kanálu.....	19
3.1.5	Atkinsonův kvadratický zákon.....	20
3.2	Teorie k tepelným výpočtům .....	20
3.2.1	Tepelný tok.....	20
3.2.2	Tepelný odpor .....	20
3.2.3	Součinitel přestupu tepla .....	21
3.2.4	Prandtlovo číslo.....	22
3.2.5	Nusseltovo číslo .....	22
3.3	Fyzikální vlastnosti vzduchu.....	22
<b>4</b>	<b>KONCEPT MĚŘENÍ</b> .....	<b>23</b>
4.1	Měření součinitele přestupu tepla.....	23
4.2	Měření odporu kanálu .....	24
4.3	Koncept měřicího algoritmu .....	24
<b>5</b>	<b>PRAKTICKÝ NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>24</b>
5.1	Hydraulická část.....	25
5.1.1	Chladicí kanál.....	25
5.1.2	Ventilátor.....	26
5.1.3	Měření průtoku.....	27
5.1.4	Měření hydraulického odporu .....	28
5.2	Tepelná část.....	29
5.2.1	Ohřev kanálu .....	29
5.2.2	Tepelná izolace kanálu od okolního prostředí .....	30
5.3	Elektronická část .....	30
5.3.1	Teplotní senzory.....	30
5.3.2	Tlakový senzor .....	32
5.3.3	Řídicí elektronika .....	33
5.3.4	Napájení zařízení.....	33
5.4	Měřicí software .....	33
5.4.1	Měřicí algoritmus .....	34
5.4.2	Řízení topných těles .....	35
5.4.3	Řízení ventilátoru.....	35
5.4.4	Výpočet a zobrazení výsledků .....	36
<b>6</b>	<b>TESTOVACÍ MĚŘENÍ</b> .....	<b>37</b>
6.1	Hladký kanál .....	37
6.2	Drsný kanál .....	37
6.3	Porovnání naměřených hodnot.....	38
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>40</b>

<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>42</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>43</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH NA CD .....</b>	<b>44</b>

# 1 ÚVOD

Důležitost ventilačního výpočtu při návrhu elektrických strojů je dána vlivem teploty na životnost a spolehlivost stroje, který bývá větší než vliv elektrického a magnetického namáhání. Při návrhu stroje se vybírá z většího počtu konstrukčních námětů, přičemž právě konstrukce stroje má na tepelné procesy v něm probíhající výrazný vliv. [1]

Při návrhu je snaha o úpravu konstrukce stroje tak, aby jeho chlazení bylo co nejúčinnější. Jednou z takových úprav jsou chladicí kanály ve statorových plechách. Těmito kanály je pomocí ventilátoru hnán vzduch, který z nich odebírá teplo. Účinnost chlazení lze hodnotit pomocí součinitele přestupu tepla mezi kanálem a proudem vzduchu. Pro danou chladicí tekutinu závisí tento součinitel na parametrech kanálu, rychlosti proudění a teplotě tekutiny. Vhodně zvolenými parametry kanálu lze tedy dosáhnout většího součinitele přestupu tepla a zvýšit tak odvod tepla ze stroje. Ovšem vztahy používané pro určování součinitele přestupu tepla při proudění v chladicím kanálu jsou empirické a v praxi dávají často jen přibližné výsledky. Odtud plyne požadavek na zařízení, které je schopno parametry chladicích kanálů měřit.

## 2 CÍLE PRÁCE

Literární průzkum problematiky ventilace strojů. Dokončení návrhu a zprovoznění experimentálního zařízení. Pro účel sestrojení zařízení již byl v laboratoři k dispozici model chladicího kanálu, topná tělesa, polystyrenová izolace a trubice se zabudovanou clonou pro měření průtoku. Cílem práce bylo osadit zařízení potřebnými senzory a elektronikou, zařízení oživit, navrhnout vhodný algoritmus měření a provést testovací měření.

## 3 TEORETICKÝ ROZBOR

Proudění tekutin spolu s vedením a přestupem tepla patří mezi rozsáhlé vědní disciplíny. Pro potřeby výpočtu chlazení elektrických strojů je nutno seznámit se alespoň se základní teorií hydraulických a tepelných výpočtů. Obsah kapitoly je zaměřen především na výpočty týkající se chladicího kanálu. Odvození uvedených vztahů, širší souvislosti a podklady ke složitějším ventilačním výpočtům, možno dohledat v literatuře [1, 2, 3], ze které tato kapitola vychází.

### 3.1 Teorie k hydraulickým výpočtům

#### 3.1.1 Reynoldsovo číslo

Obecně se proudění tekutiny v kanálu dělí na laminární a turbulentní. Parametrem, který ukazuje na druh proudění, je Reynoldsovo číslo, které je dáno vztahem:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (1)$$

Kde  $v$  je rychlost proudění tekutiny,  $D$  je průměr kanálu a  $\nu$  je viskozita tekutiny. K laminárnímu proudění dochází při nižších rychlostech, přičemž při překročení hodnoty  $Re = 2000$  přechází laminární proudění v turbulentní. Plné rozvinutí turbulentního proudění nenastává okamžitě, nýbrž v určitém rozsahu  $Re$ . Proudění s  $Re$  v rozmezí 1800 až 4000 se pokládá za přechodné. Od hodnoty  $Re = 4000$  se mluví o proudění turbulentním. V elektrických strojích se laminární proudění vyskytuje zřídka, proto se nadále budeme zabývat prouděním turbulentním.

#### 3.1.2 Odpor proudění

Části hydraulického obvodu, kde dochází k tlakovým úbytkům, jsou označovány jako odpory proudění. Jedná se o vstupy do kanálů, zúžení toku, změny směru toku, ztráty třením v dlouhých kanálech apod. Odpor proudění lze vypočítat podle vztahu:

$$K = \xi \frac{\rho}{2} \frac{1}{S^2} \quad (2)$$

kde  $\xi$  je součinitel závislý na charakteru odporu,  $\rho$  hustota tekutiny a  $S$  průřez potrubí.

V chladicím kanálu je odpor proudění způsoben vstupem do kanálu, třením o stěnu kanálu a výstupem z kanálu.

Součinitel  $\xi_{\text{vstup}}$  zohledňuje podmínky proudění před kanálem, úhel vstupu proudění, sražené hrany, zaoblení a jiné. Je-li před vstupem klidné prostředí, je  $\xi_{\text{vstup}} = 1$ . Stejně okolnosti zohledňuje součinitel  $\xi_{\text{výstup}}$  pro výstup kanálu. Je-li za výstupem klidné prostředí, součinitel  $\xi_{\text{výstup}} = 0$ . V takovém případě představuje odpor vstupu pouze tlakový spád potřebný pro vytvoření toku (dynamický tlak) a ve výpočtu lze součinitele  $\xi_{\text{vstup}}$  a  $\xi_{\text{výstup}}$  zaměnit.

Odpor třením v kanálu je závislý na Reynoldsově čísle a pro kruhový průřez je dán vztahem:

$$K = \frac{64}{\pi^2} \frac{\rho}{2} f \frac{L}{D^5} \quad (3)$$

kde  $f$  je součinitel tření v kanálu,  $L$  délka kanálu a  $D$  průměr kanálu. Lze se setkat i se vztahem

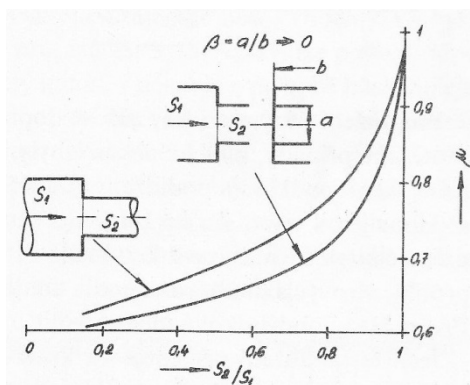
$$K = 4f \frac{L \rho}{D} \frac{1}{2 S^2} \quad (4)$$

Oba vztahy dávají podobné výsledky.

Odpor pro zúžení toku se počítá dle vztahu (2), přičemž koeficient  $\xi$  je dán vztahem

$$\xi_{\text{zúžení}} = \left( \frac{S_1}{\mu S_2} - 1 \right)^2 \quad (5)$$

kde  $S_1$  je původní průřez kanálu a  $S_2$  je průřez zúžený,  $\mu$  je součinitel kontrakce a určí se z obr. 1.



Obr. 1 Kontrakční součinitel pro náhlý kruhový přechod a úzkou štěrbinu [1]

Odpor kuželovitého zúžení je dán vztahem:

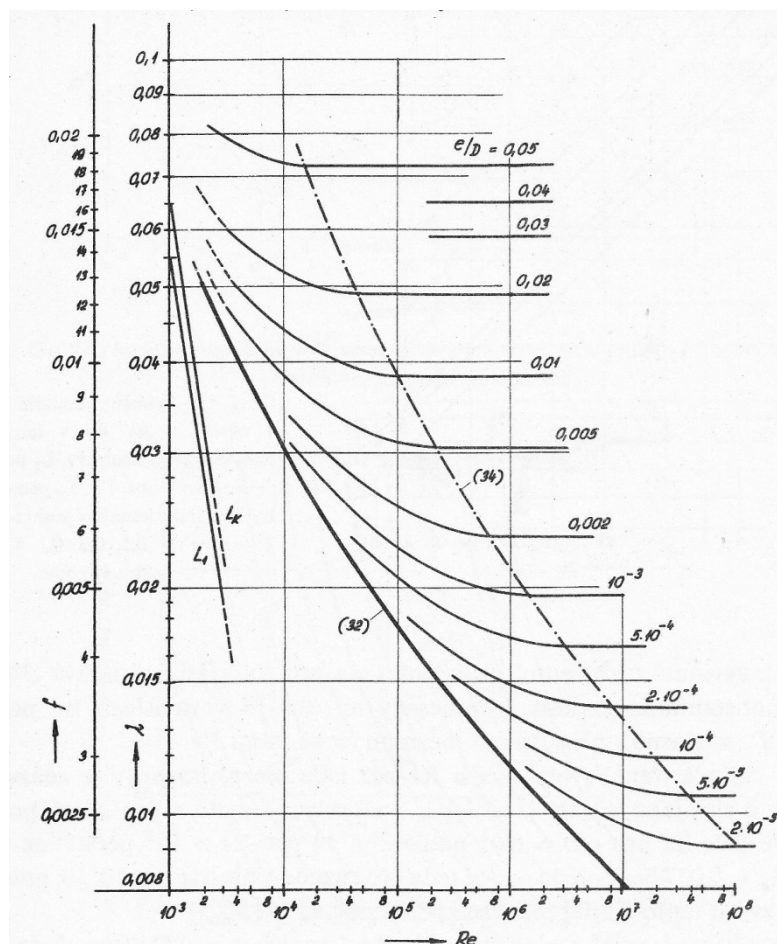
$$K_{\text{kužel}} = \frac{\rho}{2} \left[ \left( \frac{1}{\mu} - 1 \right)^2 + 1 - \left( \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right] \frac{1}{S_2^2} \quad (6)$$

Součinitel  $\mu$  se opět určuje u obr. 1.

Obsáhlým zdrojem vztahů pro výpočet koeficientů odporu a tření pro konstrukci hydromechanických zařízení je [4]. Vztahy týkající se elektrických strojů lze nalézt v [1, 2].

### 3.1.3 Součinitel tření v kanálu

Určování součinitele tření  $f$  v kanálech bylo v minulém století předmětem mnohých experimentů. Empiricky bylo odvozeno několik rovnic pro jeho výpočet. Na základě těchto rovnic byl vypočten průběh součinitele tření v závislosti na Reynoldsově čísle a poměrné drsnosti kanálu. Tento průběh je znázorněn na obr. 2.



Obr. 2 Průběhy činitelů tření  $\lambda$  a  $f = \lambda/4$  v závislosti na  $Re$  a na  $e/D$  pro kanály kruhového průřezu podle Colebrooka;  $L_k$  pro kruhový,  $L_1$  pro čtvercový průřez v laminárním oboru. Křivka podle 32 platí pro hladké kanály. Křivka 34 udává hranici, od které přestávají činitele tření v drsných kanálech záviset na  $Re$ . [1]

Poměr  $e/D$  značí poměrnou drsnost kanálu, kde  $e$  značí výšku drsnosti v kanálu a  $D$  průměr kanálu. V literatuře se lze setkat se vztahy obsahující součinitel tření  $\lambda$ . Vztah mezi oběma součiniteli je  $\lambda = 4f$ .

Pro hladké kanály a  $Re < 8 \cdot 10^4$  lze součinitel tření počítat vztahem:

$$f = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (7)$$

Vztahy pro výpočet součinitele tření u drsných kanálů jsou komplikovanější a podobně jako (7) dávají pouze přibližný výsledek. V praxi se pro drsné kanály v elektrických strojích (litina, svazky plechů napříč) počítá se součinitelem  $f = 0,015 - 0,03$ , do kterého zahrnují i jiné vlivy, které ve výpočtu nelze analyzovat.

### 3.1.4 Drsnost kanálu

Drsnost kanálu je faktor určující velikost tření v kanále a tím jeho hydraulický odpor. V literatuře se lze setkat s pojmem písečná drsnost, pomocí níž byl zjišťován průběh součinitele tření:

*„Měření, kterými se zjišťoval průběh činitele  $f$  (nebo  $\lambda$ ) na Reynoldsově čísle, byla prováděna s umělou drsností, která se připravila nalepením vrstvy písku o zrnech známého průměru (nebo skelným papírem o známé velikosti zrn), což byla „písečná drsnost“ s vyvýšeninami  $e$ , celkem pravidelně plošně rozloženými a stejnými. Tato drsnost nedávala v přechodném oboru Reynoldsových čísel průběh naznačený na obr. 2, ale komplikovanější průběh... ..Prakticky taková drsnost, pravidelná a o stejné výšce  $e$ , se v technické praxi*

nevyskytuje. Bližší skutečným podmínkám je drsnost, při níž vyvýšeniny jsou nepravidelně plošně rozloženy a pohybují se od určitého minima až po maximum, při čemž je pak nutno vzít pro  $e$  jejich střední hodnotu... ..Jednoduchou úvahou lze poznat, že skutečnou drsnost a její vliv na proudění nelze charakterizovat jedinou hodnotou středního vyvýšení  $e$ , ale že záleží i na tvaru, plošném rozložení a vzdálenostech těchto vyvýšenin... ..Ježto pro plochy přicházející v technické praxi není písečná drsnost směrodatná byla prováděna četná měření za účelem stanovit pro určitý profil skutečné drsnosti ekvivalentní písečnou drsnost, aby tak bylo možno jednoduše určovat v úplně drsném oboru (vpravo od křivky (34) na obr. 2) součinitele tření  $f$  (nebo  $\lambda$ ).“ [1]

Z měření pro zjišťování ekvivalentní písečné drsnosti bylo zjištěno, že pouze na základě maximální hloubky drsnosti  $R_p$ , nelze odhadnout správný poměr  $e/D$  pro určení součinitele tření z grafu na obr. 2. Dále, že ekvivalentní písečná drsnost pro dané  $R_p$  je závislá na vzdálenostech mezi vyvýšeninami: „...pro každé  $R_p$  existuje určitá vzdálenost dávající největší ekvivalentní drsnost. Jsou-li poměry  $R_p/D$  velké, máme zde vlastně kanál s opakovným zúžením a rozšířením... [1]

“Pro celý kanál v němž je  $n$  po sobě následujících stejných zúžení, nebude však celkový odpor  $n$ -krát větší, ale bude o něco menší, jakoby opakováním téhož pochodu odpor postupně klesal; pro  $n = 10$  zúžení bude celkový odpor pouze asi  $K_c = (7 \text{ až } 8) K_1$  a p.” [1]

### 3.1.5 Atkinsonův kvadratický zákon

Pro turbulentní proudění platí Atkinsonův kvadratický zákon:

$$Q^2 = \frac{\Delta p}{K} \quad (8)$$

kde  $Q$  značí průtok,  $\Delta p$  tlakový spád a  $K$  odpor proudění. Odvození zákona vychází z definice hydraulického odporu a je možno dohledat v literatuře. Zákon podstatně zjednodušuje hydraulické výpočty. Umožňuje výpočty hydraulických obvodů obsahující různé odpory proudění. Při analýze obvodu se nejdříve vypočítají dílčí odpory, ze kterých je poté vypočten celkový odpor obvodu. Sériové a paralelní zapojení odporů proudění se řeší stejně jako u elektrických odporů. Zákon je analogií k Ohmovu zákonu v elektrotechnice.

## 3.2 Teorie k tepelným výpočtům

V elektrických strojích se teplo šíří především vedením tělesy a přestupem z povrchů těles.

### 3.2.1 Tepelný tok

Tepelný tok je definován vztahem:

$$q = \Delta T \frac{\lambda S_t}{l} \quad (9)$$

kde  $\Delta T$  je rozdíl teplot,  $\lambda$  je tepelná vodivost látky,  $S_t$  je plocha tělesa kolmá na směr tepelného toku a  $l$  je délka tělesa.

### 3.2.2 Tepelný odpor

Pro zjednodušení výpočtů se zavádí tepelný odpor. Ten je dán vztahem:

$$R = \frac{l}{\lambda S_t} \quad (10)$$

Níže jsou uvedeny vztahy pro výpočet tepelných odporů souvisejících s chladicím kanálem

Válcová stěna:

$$R_{válec} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda 2\pi L} \quad (11)$$

kde  $r_1$  je vnitřní průměr stěny a  $r_2$  vnější průměr.

Tepelný odpor přestupu tepla

$$R_{přestup} = \frac{1}{\alpha A} \quad (12)$$

kde  $A$  je povrch tělesa a  $\alpha$  součinitel přestupu tepla.

Sériové a paralelní řazení tepelných odporů se řeší obdobně jako odpory v elektrotechnice.

Tepelný odpor toku chladiva

$$R_{tok} = \frac{1}{\rho c Q} \quad (13)$$

kde  $\rho$  hustota chladiva,  $c$  měrná tepelná kapacita chladiva a  $Q$  průtok.

### 3.2.3 Součinitel přestupu tepla

Nachází-li se těleso v klidném prostředí (stojící vzduch), tak pokud je zahřáté na vyšší teplotu, než je teplota okolního prostředí, probíhá mezi ním a prostředím přestup tepla prostřednictvím sálání a přirozené konvekce. Pro tyto současně nastávající jevy je potom celkový přestupový součinitel dán vztahem:

$$\alpha_{sk} = \alpha_k \left( 1 + 8,4 \left( \frac{A_s}{A_k} \right) \left( \frac{\varepsilon \sigma}{C_K} \right) T_0^{2,75} \right) \quad (14)$$

kde  $\varepsilon$  je emisivita tělesa,  $\sigma$  Boltzmannova konstanta a  $\alpha_k$  je součinitel přestupu tepla přirozenou konvekcí a platí pro něj vztah:

$$\alpha_k = C_K \sqrt[4]{T - T_0} \quad (15)$$

$T_2$  je teplota tělesa,  $T_1$  teplota okolí a  $C_k$  je součinitel konvekce a pro vodorovný válec o průměru  $D$  a délce  $L$  je roven:

$$C_K = 1,2 \sqrt[4]{D} \quad (16)$$

Pro součinitel přestupu tepla při turbulentním proudění kanálem, kdy nastává umělá konvekce, platí empirický vztah:

$$\alpha_{k,kanál} = k \sqrt[5]{\frac{v^4}{D}} \quad (17)$$

kde  $v$  je rychlost proudění a faktor  $k$  je dán vztahem:

$$k = m_k c \sqrt[5]{v} Pr^{-2/3} \quad (18)$$

$m_k = 0,022$  pro plyny,  $c$  je měrné teplo.

Tento vztah se dále koriguje podle délky a drsnosti kanálu. Pro korekci délky je třeba součinitel přestupu tepla vynásobit součinitelem:

$$k_L = \frac{200 D^{0.054}}{L} \quad (19)$$

Korekce drsnosti kanálu je pro poměr  $\frac{f_{drsný}}{f_{hladý}} < 4$  dána vztahem:

$$\alpha_{kor,f1} = \alpha_{k,kanál} \sqrt{\frac{f_{drsný}}{f_{hladý}}}, \quad (20)$$

pro poměr  $\frac{f_{drsný}}{f_{hladý}} > 4$  potom:

$$\alpha_{kor,f2} = \alpha_{k,kanál} \left( \frac{f_{drsný}}{f_{hladý}} \right)^{\left( \frac{100}{Re} \right)^{1/8}}. \quad (21)$$

### 3.2.4 Prandtlovo číslo

Bezrozměrné číslo popisující poměr mezi konvektivním a konduktivním šířením tepla v tekutině.

$$Pr = \frac{c \mu_v}{\lambda} \quad (22)$$

### 3.2.5 Nusseltovo číslo

Bezrozměrné číslo popisující poměr mezi konvektivním a konduktivním šířením tepla

$$Nu = \frac{\alpha_k l_{ch}}{\lambda} \quad (23)$$

kde  $l_{ch}$  značí charakteristický rozměr (u kanálu se jedná o vnitřní průměr).

## 3.3 Fyzikální vlastnosti vzduchu

Pro výpočet konstant uvedených v předchozích kapitolách je zapotřebí znát některé fyzikální konstanty pro vzduch. Těmito konstantami jsou hustota, kinematická viskozita, měrná tepelná konstanta a měrná tepelná vodivost. Všechny tyto konstanty jsou závislé na tlaku a teplotě vzduchu.

*„Změny tlaku vzduchu v elektrickém stroji jsou oproti atmosférickému tlaku poměrně nepatrné. Nepřihlížíme-li ke speciálním případům, lze tyto změny zanedbat a počítat s hodnotami fyzikálních konstant, které odpovídají odhadnutému střednímu tlaku ve stroji a ještě jednodušeji tlaku atmosférickému. Vliv vlhkosti je též nepatrný, takže nepočítáme se změnami, jež nastanou oteplením vzduchu při průchodu strojem. Největší změny fyzikálních konstant nastanou oteplením, takže je důležité odhadnout správně střední teplotu vzduchu ve stroji, abychom mohli předpokládat, že konstanty určené pro tuto střední teplotu se budou měnit jen nepatrně při průchodu vzdušného toku strojem i při kolísání vstupní teploty.“ [1]*

Vztah pro hustotu vzduchu při atmosférickém tlaku:

$$\rho = 1,239 \cdot \frac{273}{T} \quad (24)$$

kde  $T$  je termodynamická teplota vzduchu.

Vztah pro dynamickou viskozitu vzduchu:

$$\mu_v = 9,806 \cdot \frac{1,478 \cdot 10^{-7} \sqrt{T}}{1 + \frac{110,4}{T}} \quad (25)$$

Vztah pro kinematickou viskozitu vzduchu:

$$\nu_v = \frac{\mu_v}{\rho} \quad (26)$$

Vztah pro tepelnou vodivost vzduchu:

$$\lambda = 0,0243 (1 + 0,00306 t) \quad (27)$$

kde  $t$  je teplota vzduchu ve °C.

Vztah pro měrnou tepelnou kapacitu vzduchu

$$c = 0,0113 t^2 - 4,5426 t + 1299,5 \quad (28)$$

Vztah (28) byl získán proložení tabulkových hodnot uvedených v [1] polynomem.

## 4 KONCEPT MĚŘENÍ

Míru ochlazování stroje chladicím kanálem je možno určit na základě hodnoty součinitele přestupu tepla mezi vnitřní stěnou kanálu a proudem vzduchu. Tento součinitel mimo jiné závisí na hydraulickém odporu kanálu. Čím je drsnost kanálu větší, tím více je kanál ochlazován. Nutno si uvědomit, že zvýšením odporu kanálu jsou kladeny vyšší nároky na ventilátor elektrického stroje. Proto je potřebné kromě součinitele přestupu tepla měřit také hydraulický odpor chladicího kanálu. Účinnost chladicích kanálů je poté možno hodnotit podle těchto dvou kritérií. Například je-li dán maximální dovolený tlakový úbytek, který může na kanálu vzniknout, proměří se několik chladicích kanálů s různými drsnostmi. Jako nejvíce účinný je potom označen kanál s největší hodnotou součinitele přestupu tepla, který zároveň nepřekročí hranici maximálního tlakového úbytku.

### 4.1 Měření součinitele přestupu tepla

Při vstupu do kanálu má proud chladiva teplotu  $t_{in}$ . Teplota chladiva je během proudění kanálem zvýšena na teplotu  $t_{out}$ . Proud chladiva je tedy dodána energie prostřednictvím tepelného toku. Odpor proudu chladiva je dán vztahem (13). Při znalosti teplot  $t_{in}$  a  $t_{out}$  je potom tepelný tok ohřívající chladivo dán následovně

$$q = (t_{out} - t_{in}) \rho c Q \quad (29)$$

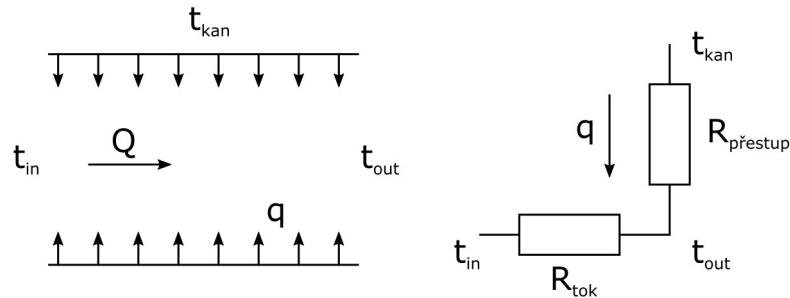
Situace je zobrazena na obr. 3. Jelikož se jedná o izolovanou soustavu, tak jediným zdrojem tepelného toku je chladicí kanál. Přenos tepla mezi chladicím kanálem a proudem chladiva probíhá prostřednictvím nucené konvekce, jejíž odpor dán vztahem (12). Dosazením (12) do (9) a vyjádřením dostaneme vztah pro součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_{konv} = \frac{q}{(t_{kan} - t_{out}) \cdot A} \quad (30)$$

Po dosažení rovnice (29):

$$\alpha = \frac{\rho \cdot c \cdot Q \cdot (t_{out} - t_{in})}{(t_{kan} - t_{out}) \cdot A} \quad (31)$$

Pro určení součinitele tepla je tedy nutno znát následující veličiny: hustotu  $\rho$  a měrnou tepelnou kapacitu  $c$  vzduchu, průtok chladiva  $Q$ , vstupní a výstupní teplotu chladiva  $t_{in}$  a  $t_{out}$ , teplotu kanálu  $t_{kan}$  a vnitřní plochu kanálu  $A$ .



Obr. 3 Schéma výpočtu součinitele přestupu tepla

## 4.2 Měření odporu kanálu

Na hydraulickém odporu vzniká při průtoku tekutiny tlakový úbytek. Při turbulentním proudění platí Atkinsonův zákon, ze kterého se při znalosti tlakového úbytku a průtoku nechá vypočíst hydraulický odpor:

$$K = \frac{\Delta p}{Q^2} \quad (32)$$

Při znalosti tlakového úbytku způsobeného chladicím kanálem a průtoku chladiva lze tedy měřit hydraulický odpor kanálu.

## 4.3 Koncept měřicího algoritmu

Princip měření vychází z teorie popsané v kapitole 2. Před začátkem měření je chladicí kanál třeba ohřát na požadovanou teplotu. Po dosažení požadované teploty na povrchu kanálu je třeba tuto teplotu udržovat a vyčkat na prohřátí celého objemu kanálu. Po uplynutí této doby je možno spustit ventilátor. Po dosažení požadované rychlosti proudění a ustálení teploty proudu vzduchu vystupujícího z kanálu je možno změřit data. Po uložení naměřených dat lze ventilátor a ohřev kanálu vypnout, z naměřených dat vypočíst hledané konstanty a ty zobrazit uživateli.

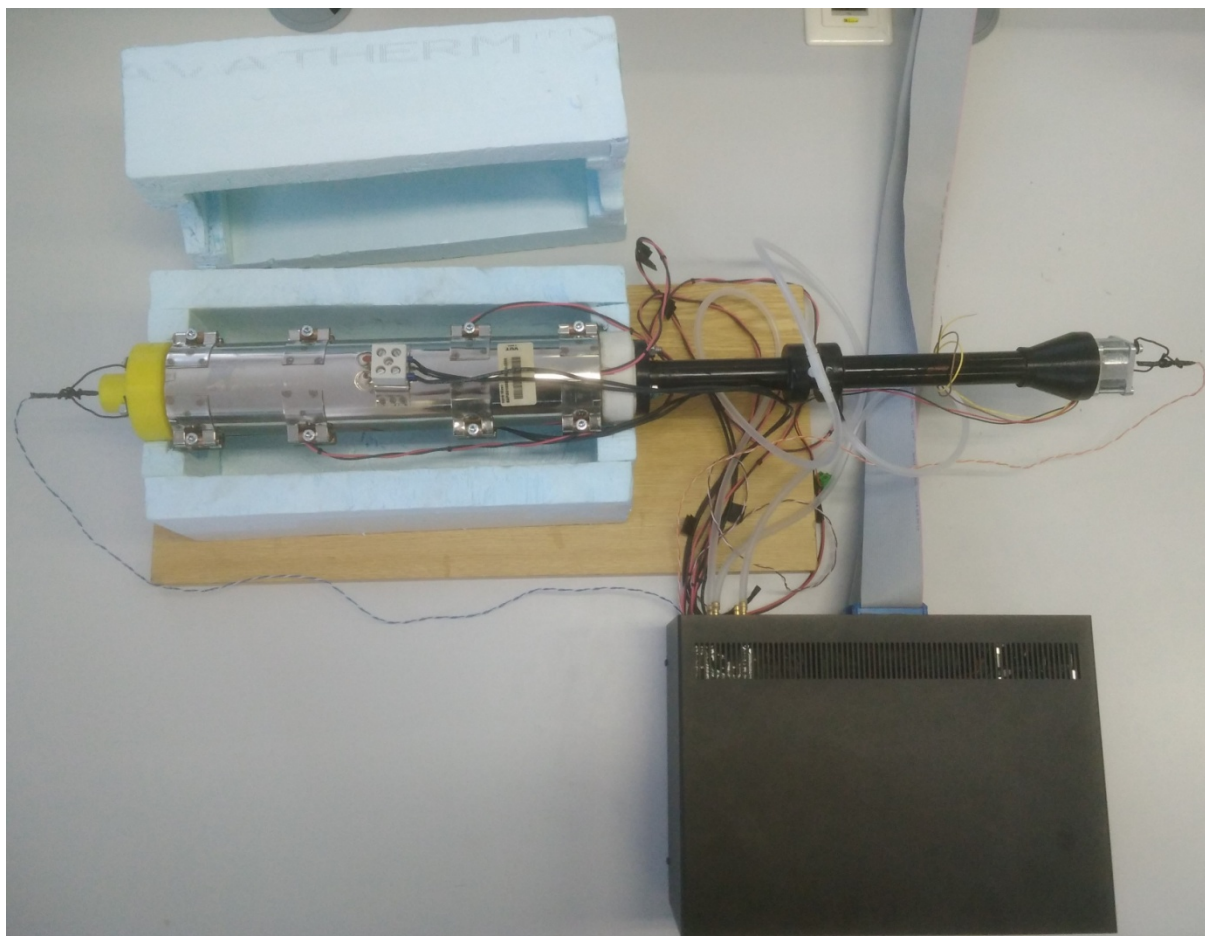
# 5 PRAKTICKÝ NÁVRH ZAŘÍZENÍ

Návrh zařízení vychází z požadavků na měřené veličiny (kapitola 4) a z potřeby jejich vyhodnocení pomocí PC. Základní koncept je dán trubici se clonou pro měření průtoku, chladicím kanálem, topnými tělesy a tepelnou izolací. Tyto části byly pro účel sestavení zařízení již k dispozici a jejich návrh není součástí této práce.

Hydraulický obvod zařízení začíná ventilátorem, který je pomocí šroubů připevněn k trubici. Trubice je s chladicím kanálem spojena pomocí závitových tyčí, které tvoří konstrukci

kanálu. Na vnějším povrchu kanálu jsou připevněna topná tělesa. Kanál spolu s topnými tělesy je od okolního prostředí tepelně izolován polystyrenovým krytem. Za účelem regulace teploty chladicího kanálu jsou po jeho povrchu umístěna tři teplotní čidla. Čidla pro snímání teploty vzduchu před ventilátorem a těsně u výstupu z kanálu jsou upevněna za pomoci drátu. K otvorům pro měření statického tlaku v trubici jsou připojeny dva senzory tlaku. Jeden pro měření průtoku a druhý za účelem měření odporu chladicího kanálu.

Měřicí i výkonová elektronika zařízení je umístěna v kovové krabici o rozměrech 302 x 124 x 217 mm. Tato krabice je spojena kabely s měřicí kartou MF624, přes kterou měřicí software (Simulink) se zařízením komunikuje.



Obr. 4 Experimentální zařízení

## 5.1 Hydraulická část

### 5.1.1 Chladicí kanál

Chladicí kanál sestává z plechových kroužků nasunutých na závitové tyče (viz obr. 5, 6). Přidáním kroužků s menším vnitřním průměrem lze vytvořit umělou drsnost popisovanou v kapitole 3.1.4 a tím zvýšit hydraulický odpor kanálu a součinitel přestupu tepla.



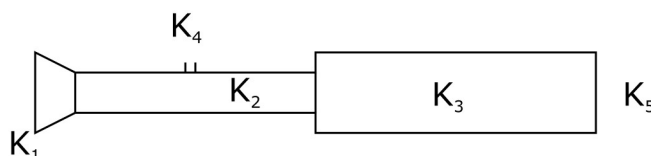
Obr. 5 Chladicí kanál



Obr. 6 Plechový kroužek pro konstrukci chladicího kanálu

### 5.1.2 Ventilátor

Pro výběr ventilátoru je potřebné znát alespoň přibližně parametry hydraulické obvodu, ve kterém má být ventilátor používán. Parametrem popisujícím hydraulický obvod je  $pQ$  charakteristika. Ta udává statický tlak, který je potřeba do obvodu dodat, aby bylo dosaženo požadovaného průtoku. Pro výpočet této charakteristiky je třeba znát odpor daného obvodu. Celkový hydraulický odpor měřeného obvodu je dán součtem dílčích odporů podle obr. 7.



Obr. 7 Odpor v hydraulickém obvodu zařízení

Tyto odpory jsou oceněny podle teorie uvedené v [1]:

- K1 - kuželovité zúžení (počítán podle vztahu (6))
- K2 – hladký kanál (počítán podle vztahů (2, 7))
- K3 – drsný kanál (počítán podle vztahu (4))
- K4 – clona – zúžení průtoku (počítán podle vztahů (2, 5))
- K5 – výstup (počítán podle vztahu (2))

V kanálu s umělou drsností bude navíc odpor od zúžení průtoku  $K_6$  (vztahy (2, 5)).

Celkový odpor obvodu s kanálem bez umělé drsnosti je dán vztahem:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 \quad (33)$$

Celkový odpor obvodu s kanálem s umělou drsností je dán vztahem:

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + K_4 + K_5 + n \cdot K_6 \quad (34)$$

kde  $n$  je počet zúžení v kanálu.

Účelem této práce není uvádět zde postupy výpočtů těchto odporů ani jednotlivé výsledky. Ty lze nalézt v příloze *pQCharakteristikaKanalu.m*, kde jsou jednotlivé vztahy uvedeny. Výstupem tohoto skriptu je křivka závislosti tlakového úbytku na průtoku. Tato křivka je získána zvolením intervalu průtoků, pro něž je vztahem (8) vypočten tlakový úbytek.

Porovnáním pQ křivky hydraulického obvodu se zatěžovací charakteristikou ventilátoru je získán pracovní bod ventilátoru (jedná se o bod, kde se obě křivky protínají).

Pro měřicí zařízení byl vybrán ventilátor SanAce 40, který by měl být v obvodu schopen vyvodit průtok 0,3 m<sup>3</sup>/min (odpovídá rychlosti 15,9 m/s) pro kanál bez umělé drsnosti. Pro kanál s umělou drsností potom průtok přibližně 0,2 m<sup>3</sup>/min (odpovídá rychlosti 10,9 m/s).

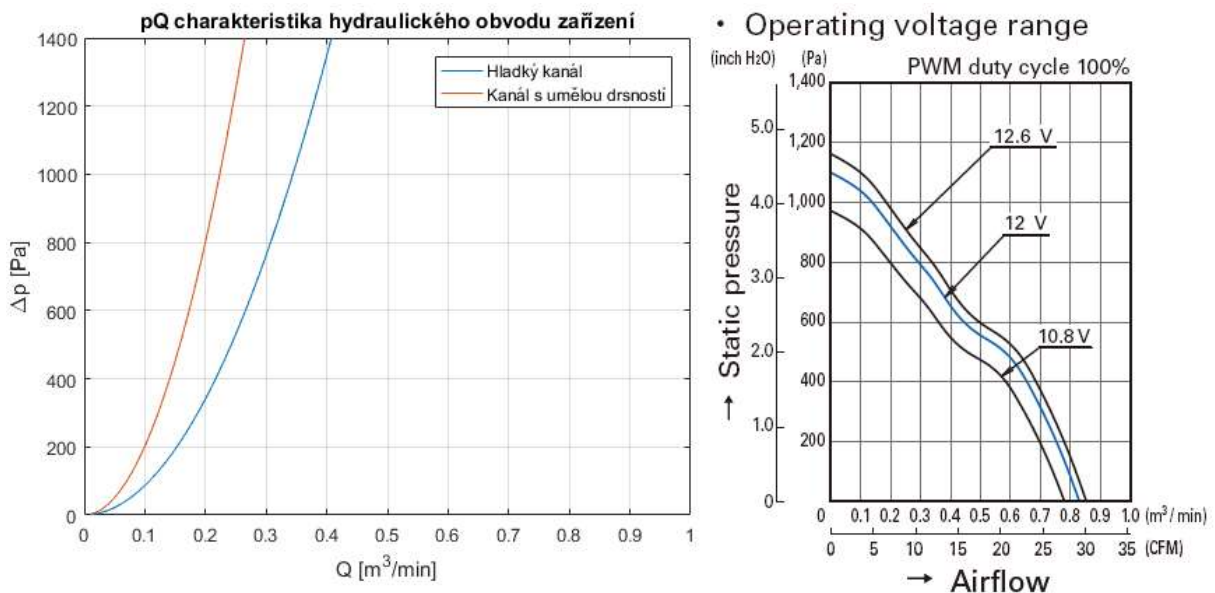
Základní parametry ventilátoru:

Jmenovité napětí: 12 V

Jmenovitý proud: 1,5 A

Frekvence signálu PWM: 25 kHz

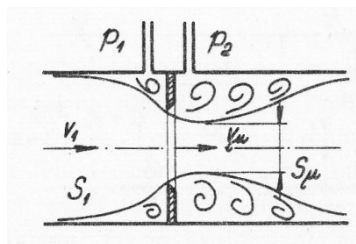
Podrobnější informace v [9].



Obr. 8 Pracovní bod ventilátoru (vlevo pQ charakteristika hydraulického obvodu zařízení, vpravo zatěžovací charakteristika ventilátoru SanAce40 [9])

### 5.1.3 Měření průtoku

K měření průtoku kanálem slouží clona umístěná v trubce připevněné ke kanálu. Princip měření průtoku clonou je založen na rozdílu statických tlaků před a za clonou.



Obr. 9 Schéma clony pro měření průtoku [1]

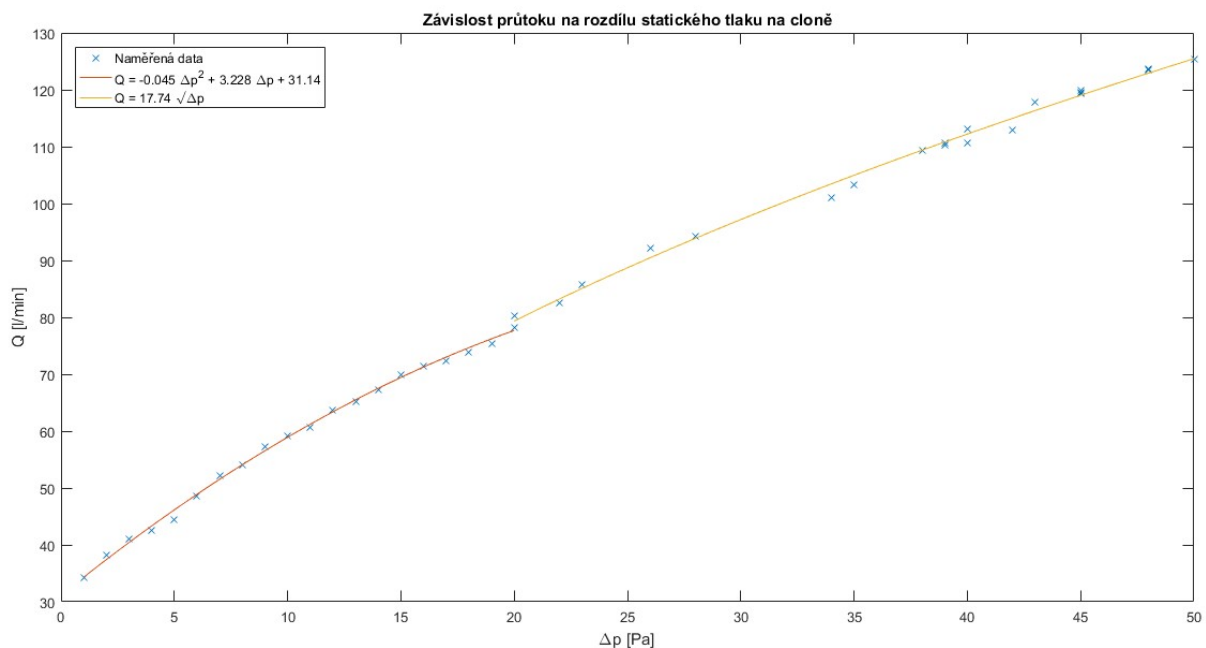
Průtok je dán vztahem

$$Q = \alpha_c \cdot S_2 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1 - p_2)} \quad (35)$$

kde alfa je konstanta závislá na rozměrech clony a potrubí a  $S_2$  je vnitřní průměr clony. Rozměry i hustota vzduchu jsou konstantní a je tedy možné výraz upravit do tvaru

$$Q = konst \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (36)$$

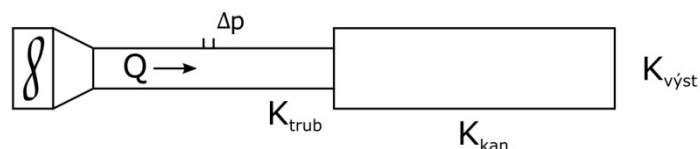
Kalibrace clony byla provedena průtokoměrem TSI4040 a tlakoměrem VPT-100. Výsledkem měření je křivka závislosti průtoku na rozdílu statických tlaků před a za clonou. Do diferenčního tlaku 20 Pa jsou naměřené hodnoty aproximovány polynomem. Od této hodnoty (odpovídající průtoku 80 l/min a Reynoldsovu číslu  $5,6 \cdot 10^3$ ) je již plně rozvinuto turbulentní proudění a tudíž lze využít vztahu (36) a získat tak konstantu clony.



Obr. 10 Graf závislosti průtoku na rozdílu statického tlaku na cloně

### 5.1.4 Měření hydraulického odporu

Princip měření odporu kanálu vychází z Atkinsonova zákona a následujícího obrázku.



Obr. 11 Schéma k odvození vztahu pro výpočet hydraulického odporu kanálu

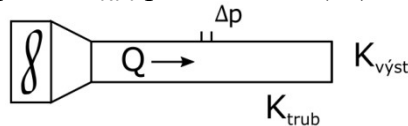
Pro hydraulický obvod na obr x platí:

$$K_{trub} + K_{kan} + K_{výst} = \frac{\Delta p}{Q^2} \quad (37)$$

Upravením dostaneme vztah pro odpor kanálu:

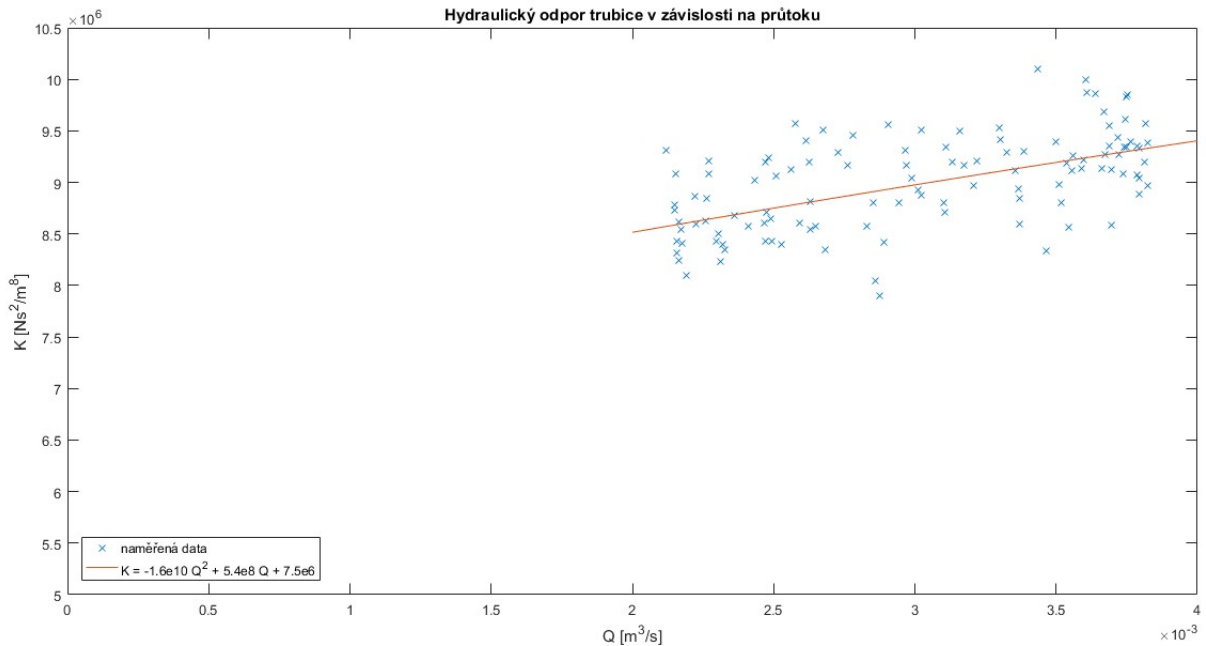
$$K_{kan} = \frac{\Delta p}{Q^2} - (K_{tr} + K_{výst}) \quad (38)$$

$\Delta p$  je rozdíl statického tlaku v trubce vůči tlaku atmosférickému. Pro určení odporů  $K_{trub}$  a  $K_{výst}$  vyjdeme z obrázku 12. Změřením rozdílu statického tlaku v trubici vůči tlaku atmosférickému pro známé průtoky lze získat závislost odporu  $K = K_{trub} + K_{výst}$  na průtoku  $Q$  a tuto závislost využít pro výpočet  $K_{kan}$  podle vztahu (38).



Obr. 12 Měření odporu trubky a výstupu

Rozptyl naměřených hodnot v grafu je dán rozkmitáním membrány kapacitního tlakoměru. Tento jev je u kapacitních tlakoměrů častý. Řešení je změřit v čase více hodnot a skutečnou hodnotu tlaku získat jejich zprůměrováním. Data v grafu nebyla průměrována, ale proložena polynomem, což lze považovat za dostatečné přiblížení se průměrné hodnotě.



Obr. 13 Graf závislosti hydraulického odporu trubice (pro potřeby měření h. odporu kanálu)

## 5.2 Tepelná část

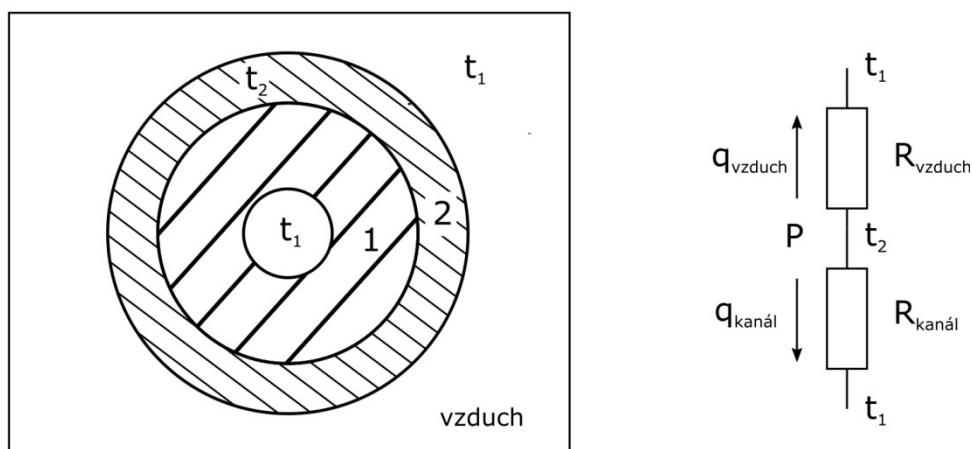
### 5.2.1 Ohřev kanálu

K ohřevu kanálu slouží dvě topná tělesa žlábkovitého tvaru. Ta jsou konstruována tak, aby se jejich vzájemným spojením šrouby docílilo obepnutí vnějšího povrchu chladicího kanálu. Tímto lze simulovat ohřev chladicího kanálu v tepelném stroji.

Každé z těles je napájeno napětím 24V a má výkon 100W. Ovládání výkonu těles je zajištěno pomocí ON/OFF regulace.

Způsob výpočtu času potřebného na prohřátí kanálu vychází ze zjednodušeného modelu ohřívání soustavy, který je zobrazený na obr. 14 vlevo. Těleso 1 představuje chladicí kanál, těleso 2 spojená topná tělesa. Pro zjednodušení je předpokládáno, že topná tělesa

dokonale obepínají chladicí kanál a mezi kanálem a tělesy je teplo šířeno vedením. Naproti tomu ohřev vzduchu vnějším povrchem topných těles je uskutečněn sáláním a přirozenou konvekcí. Objem vzduchu je konečný a je dán tvarem tepelné izolace. Celou situaci lze schematicky zobrazit podle obr. 14 vpravo.



Obr. 14 Schematické vyjádření ohřevu kanálu (vlevo) a řešení pomocí tepelných odporů (vpravo)

Topná tělesa jsou zdrojem tepelného toku  $q$ , který je číselně roven celkovému výkonu těles, který je  $P = 200 \text{ W}$ . Tento tok se rozděluje na toky  $q_{\text{vzduch}}$  a  $q_{\text{kanál}}$ . Pro zjištění velikosti toku  $q_{\text{kanál}}$  lze použít analogii vztahu pro proudový dělič v elektrotechnice:

$$q_{kan} = P \cdot \frac{R_{vzduch}}{R_{vzduch} + R_{kan}} \quad (39)$$

Odpory  $R_{\text{vz}}$  a  $R_{\text{kan}}$  jsou dány vztahy (10, 11, 13, 14, 15). Přibližná doba ohřevu kanálu lze potom za použití prvního termodynamického zákona vyjádřit vztahem:

$$\tau = \frac{c_{kan} \cdot m_{kan} \cdot (t_2 - t_1)}{q_{kan}} \quad (40)$$

Při testování bylo zjištěno, že chladicí kanál se neprohřívá rovnoměrně po celé délce. Proto je při měření hodnota  $\tau$  násobena koeficientem 2,5.

## 5.2.2 Tepelná izolace kanálu od okolního prostředí

Pro přiblížení reálným podmínkám, kdy se chladicí kanál nachází ve statorových plechách uvnitř elektrického stroje o neměnné teplotě, je chladicí kanál spolu s topnými tělesy tepelně izolován od okolního prostředí. Toto je uskutečněno krytem z extrudovaného polystyrenu. Běžně udávaná hodnota maximální teploty, pro kterou lze extrudovaný polystyren použít je  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  (nad touto teplotou dochází k jeho deformaci). Při testování byl tento kryt bez komplikací používán při teplotě  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pokud by v budoucnu k deformacím docházelo, možným řešením je vylepit vnitřní část krytu korkem.

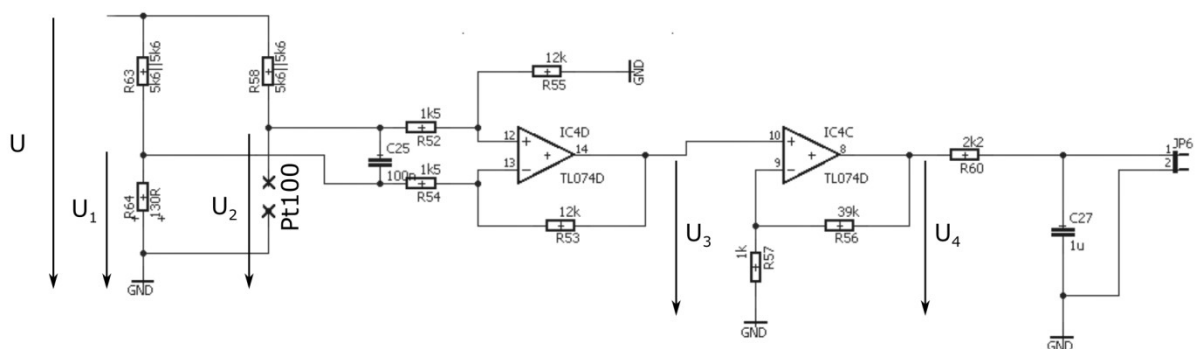
## 5.3 Elektronická část

### 5.3.1 Teplotní senzory

K měření teploty je použit šesti-kanálový teploměr s čidly Pt100 (využívá se pět kanálů). Tento teploměr byl vyroben podle čtyř-kanálového teploměru, který je v laboratoři používán. Tři čidla jsou umístěna v prostoru mezi chladicím kanálem a topnými tělesy. Čidla jsou umístěna na začátku, uprostřed a na konci kanálu, přičemž jsou po obvodu kanálu vůči sobě

posunuta o 120°. Zbylá čidla jsou umístěna vně zařízení a to před vstupem do kanálu a za výstupem z kanálu.

Čidlo Pt100 je v teploměru zapojeno do Wheatstoneova můstku, ze kterého je snímáno diferenční napětí. Toto napětí je zesíleno diferenčním zesilovačem. Výstup z diferenčního zesilovače je zesílen dalším operačním zesilovačem (dále OZ), jehož výstup je vyveden do měřicí karty. Měřicí rozsah čidel Pt100 je -200 až 850 °C. Analogový vstup měřicí karty má rozsah vstupního napětí -10 až +10 V. Maximální teplota, kterou je zařízení schopno změřit, tedy odpovídá 10 V zesíleného napětí na výstupních svorkách teploměru. Pro výpočet této teploty vyjdeme z obr. 15 a z [6, 8].



Obr. 15 Schéma zapojení čidla Pt<sub>100</sub>

Pro zesílení OZ IC4D (diferenční zesilovač) podle obrázku platí vztah:

$$K_{dif} = \frac{R_{55}}{R_{52}} \quad (41)$$

Pro zesílení OZ IC4C (proporcionální člen) podle obrázku platí vztah:

$$K_{prop} = \frac{R_{56}}{R_{57}} + 1 \quad (42)$$

Napětí snímané z můstku je dáno rozdílem napětí  $U_2$  a  $U_1$ :

$$U_m = U_2 - U_1 \quad (43)$$

Pro napětí na rezistoru  $R_{64}$  vyjádřením ze známého vztahu pro dělič napětí potom platí:

$$U_1 = U \cdot \frac{R_{64}}{R_{63} + R_{64}} \quad (44)$$

Napětí  $U = 3$  V.

Napětí  $U_2$  na čidle Pt<sub>100</sub> je potom větší o napětí  $U_m$ :

$$U_2 = U_1 + U_m = 0,133 + 0,031 = 0,164 \text{ V} \quad (45)$$

Využitím vztahu pro dělič napětí a vyjádřením získáme hodnotu odporu čidla Pt100:

$$R_{Pt100} = R_{58} \cdot \frac{U_2}{U - U_2} \quad (46)$$

Dosazením číselných hodnot do výše uvedených vztahů obdržíme tyto výsledky:

$$K_{dif} = 8, K_{prop} = 40, U_4 = 10 \text{ V}, U_1 = 0,133 \text{ V}, U_2 = 0,164 \text{ V}, R_{Pt100} = 162 \Omega$$

Odpovídající teplota je dána řešením kvadratické rovnice popisující závislost odporu čidla Pt100 na teplotě:

$$R_{Pt100} = R_0(1 + A \cdot t + B \cdot t^2) \quad (47)$$

Pro  $R_0 = 100\text{ohm}$ ,  $R_{Pt100} = 162\text{ohm}$ ,  $A = 3,9083e-3$  a  $B = -5,775e-7$  je teplota čidla rovna přibližně  $162\text{ }^\circ\text{C}$ . Při ožívování byly u některých kanálů rezistory v můstku  $R_{62}$  a  $R_{58}$  vyměněny za  $2k\Omega$ . Pro toto zapojení vychází maximální měřitelná teplota při zapojení k měřicí kartě přibližně  $144\text{ }^\circ\text{C}$ . Uvedené hodnoty jsou orientační. V praxi je třeba počítat s odchylkou způsobenou výrobní tolerancí součástek. Horní mez měřitelných teplot přesahuje teploty, na které bude chladicí kanál ohříván, teploměr lze tedy v tomto zapojení pro měřicí zařízení použít.

Při kalibraci byl teploměr připojen k PC a čidla byla vkládána do vodní lázně o známé teplotě. Pomocí Simulinku byla zaznamenána výstupní napětí teploměru pro dané teploty. Byla tak získána závislost teploty na vstupním napětí. Při kalibraci byla v rozsahu teplot  $0$  až  $100\text{ }^\circ\text{C}$  uvažována lineární závislost odporu čidla na teplotě. Při potřebě měřit teploty nad  $100^\circ\text{C}$  je třeba provést novou kalibraci teploměru.

Pro čidla umístěná na povrchu chladicího kanálu, je použit kabel určený pro teploty do  $185\text{ }^\circ\text{C}$ . Čidla Pt100 jsou obalena smršťovací bužírkou použitelnou pro teploty do  $125\text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.3.2 Tlakový senzor

Na základě testovacích měření byl vybrán senzor diferenčního tlaku Omega PX277.

Základní parametry senzoru:

nastavitelný rozsah měření:  $0 - 312,5\text{ Pa}$   
 $0 - 625\text{ Pa}$   
 $0 - 1250\text{ Pa}$

napájecí napětí:  $12 - 40\text{ V}$   
 maximální odebíraný proud:  $10\text{ mA}$   
 přesnost:  $1\%$  rozsahu  
 výstupní napětí:  $0 - 10\text{ V}$

Podrobnější informace lze nalézt v [10, 11].

Pro měřicí zařízení jsou použity dva tyto senzory. Oba jsou napájeny kartou MF624 a výstupní signál je vyveden do A/D převodníků karty. Signál je v Simulinku přepočítán na diferenční tlak. Vztah pro přepočítání byl určen na základě kalibrace, která byla provedena pomocí tlakoměru Voltcraft VPT-100. Při kalibraci se ukázalo, že měřicí rozsahy senzorů nezačínají na  $0\text{ Pa}$ , ale jsou posunuty o určitou hodnotu. Nastavením trimrů na senzorech by měřicího rozsahu udávaného výrobcem šlo dosáhnout. Ovšem pro účel měření průtoku a odporu kanálu není měření tlaku pod stávajícími rozsahy senzorů podstatné a proto nebyly rozsahy přístrojů upravovány.

Senzory nesou podle jejich sériových čísel pracovní označení 55 a 56. Senzor s označením 56 použitý k měření průtoku je zkalibrován v rozsahu  $26 - 313\text{ Pa}$ . Přičemž dolní hranice  $26\text{ Pa}$  odpovídá rychlosti proudění  $4,7\text{ m/s}$  (oblastí zájmu jsou rychlosti  $7\text{ m/s}$  a vyšší) a maximální naměřený diferenční tlak na cloně při její kalibraci byl  $150\text{ Pa}$ . Rozsah senzoru pro tuto aplikaci je tedy dostačující.

Senzor s označením 55 použitý pro měření odporu kanálu je zkalibrován pro rozsahy  $42 - 367\text{ Pa}$  a  $56 - 665\text{ Pa}$ . Měřicí rozsah je třeba nastavit manuálně přepínačem *S1* umístěným na senzoru. Před změnou rozsahu je nutné zařízení vypnout a odpojit od měřicí karty.

0 - 5.0 "wc / 1250 pa (default)



0 - 2.5 "wc / 625 pa



0 - 1.25 "wc / 312.5 pa



Obr. 16 Nastavení měřicího rozsahu tlakoměru [10]

Pro oba rozsahy je použit jiný přepočítání napětí na diferenční tlak, proto je třeba v měřicí aplikaci před spuštěním měření vybrat měřicí rozsah odpovídající nastavenému rozsahu na senzoru.

Zvenku krabice jsou vstupy pro měření tlaku označeny písmeny *H* (high) a *L* (low) a dále *průtok* a *odpor*. Hadačky z těchto vstupů je třeba správně zapojit k měřicím místům na cloně. Pro měření průtoku se hadička *H* připojuje před clonu (zde je vyšší tlak) a hadička *L* za clonu. K měření odporu se hadička *H* připojí za clonu. Vstup *L* zůstává nepřipojený.

### 5.3.3 Řídicí elektronika

Pro řízení výkonu ventilátoru a topných těles byly vyrobeny tři kopie driveru GPSWV01 používaného v laboratoři. Spínací tranzistor v něm použitý je dostatečně předimenzovaný a nebude tak docházet k jeho přílišnému ohřevu.

Základní parametry:

- Napájecí napětí: 12 – 24 V
- Maximální výkonový proud: 30 A
- Řídicí signál PWM: 0 – 5 V
- Galvanické oddělení ISO7710

### 5.3.4 Napájení zařízení

Měřicí a výkonová část zařízení je napájena odděleně. K napájení měřicí elektroniky je využito karty MF624. Ta poskytuje tyto napájecí piny: +12 V (150 mA), -12 V (150 mA), 2x +5 V (500 mA).

Výkonová část má celkový výkon 218 W (2 topná tělesa, ventilátor). Požadavky pro zdroj napájení byly následující: výstupní napětí 24 V (topná tělesa), dostatečný výkon, cena. Na základě těchto požadavků byl vybrán zdroj napětí Berge SLIM o výkonu 360W a výstupním napětí 24 V.

Pro ventilátor je třeba snížit napětí na 12 V a poskytnout výstupní proud 1,5 A. Pro tento účel byl zakoupen nastavitelný napájecí modul s těmito parametry:

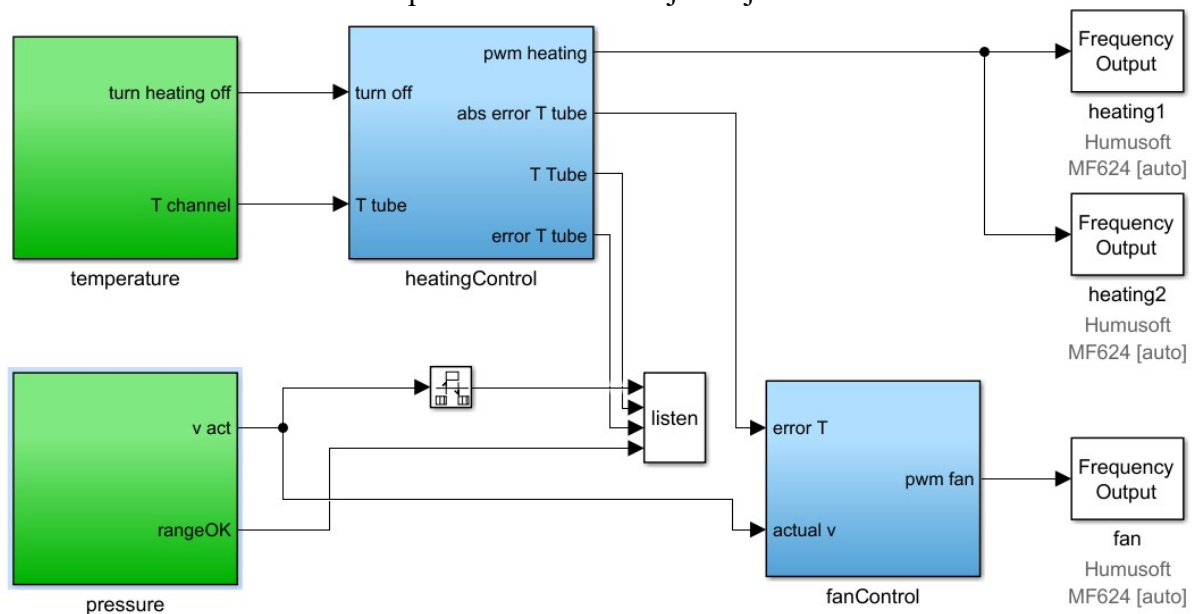
- Vstupní napětí: 4,5 – 53 V
- Výstupního napětí: 3 – 35 V
- Výstupním proud: 3 A

Zakoupení nastavitelného napájecího modulu bylo časově i finančně výhodnější, než jeho případná výroba.

## 5.4 Měřicí software

Uživatelské prostředí je vytvořeno v softwaru Matlab nástrojem GUIDE. Samotné měření probíhá v prostředí Matlab Simulink. To je přes kartu MF624 propojeno se senzory a výkonovou elektronikou. Při tvorbě tohoto softwaru bylo čerpáno z [5, 7].

Model je rozdělen do několika částí viz obr. 17. Zeleně označené bločky převádějí napět'ový signál ze senzorů tlaku a teploty na měřené veličiny. Vztahy pro přepočítání byly získány kalibrací (5.3.1, 5.3.2). Modře označené bločky slouží k regulaci výkonu topných těles a ventilátoru. Bloček *listen* pravidelně aktualizuje údaje zobrazované uživateli.

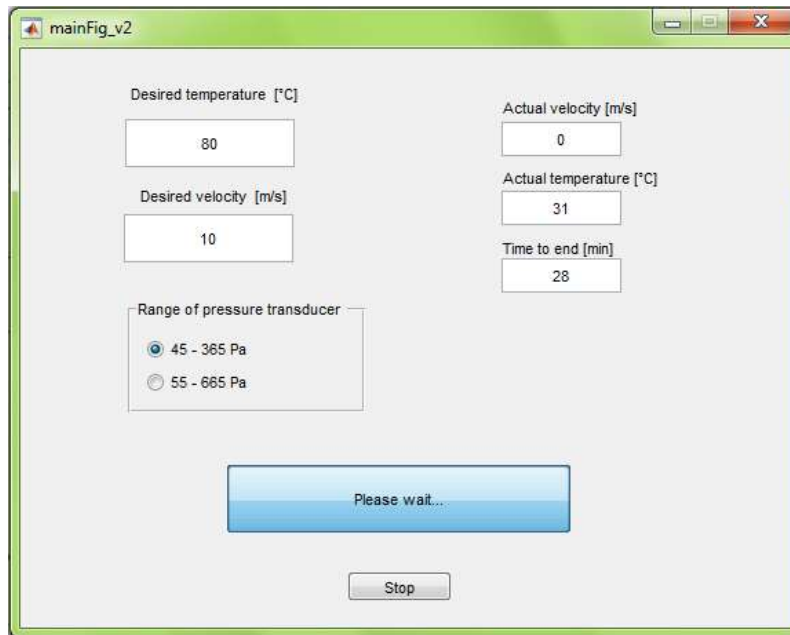


Obr. 17 Model v Simulinku pro měření

#### 5.4.1 Měřicí algoritmus

Pro spuštění aplikace je třeba spustit funkci *mainFig\_v2.m*. Touto funkcí je celý proces měření řízen. Před spuštěním měření je třeba zadat požadovanou teplotu kanálu, rychlost proudění a měřicí rozsah tlakového čidla pro měření odporu kanálu.

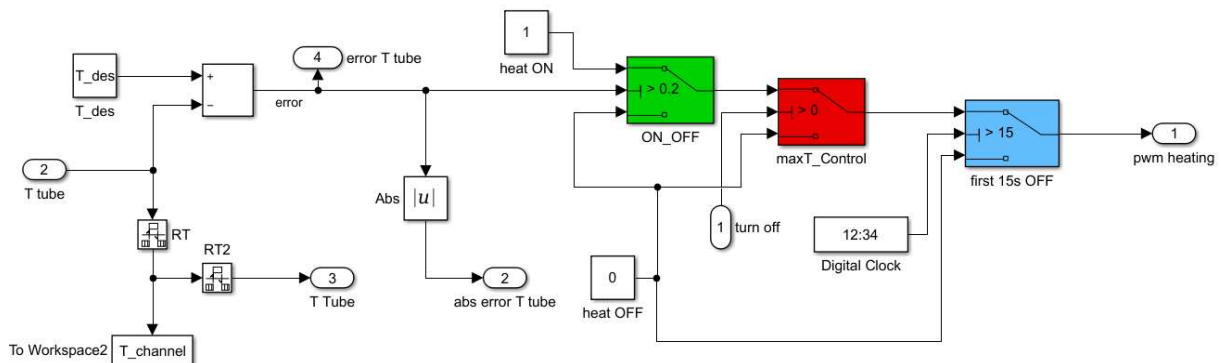
Po spuštění měření je proveden testovací běh ventilátoru, kterým se zjišťuje, zda je nastavený měřicí rozsah tlakového čidla pro měření odporu kanálu dostačující (viz kapitola 5.3.2). Uživateli je během měření zobrazována teplota topného tělesa, rychlost proudění a čas zbývající do konce měření (viz obr. 18) Teplota zobrazující se uživateli je teplota topných těles (na povrchu kanálu) nikoliv kanálu samotného, proto ačkoli tato teplota bude rovna požadované teplotě již krátce po začátku měření, čas zbývající do konce měření může být i několik desítek minut. Zbývající čas je vypočten funkcí *heatingTime.m* podle kapitoly 5.2.1. Po prohrání kanálu je opět spuštěn ventilátor a provedeno měření. Výpočet a zobrazení výsledků je popsán v kapitole 5.4.4.



Obr. 18 Uživatelské prostředí měřicího programu

### 5.4.2 Řízení topných těles

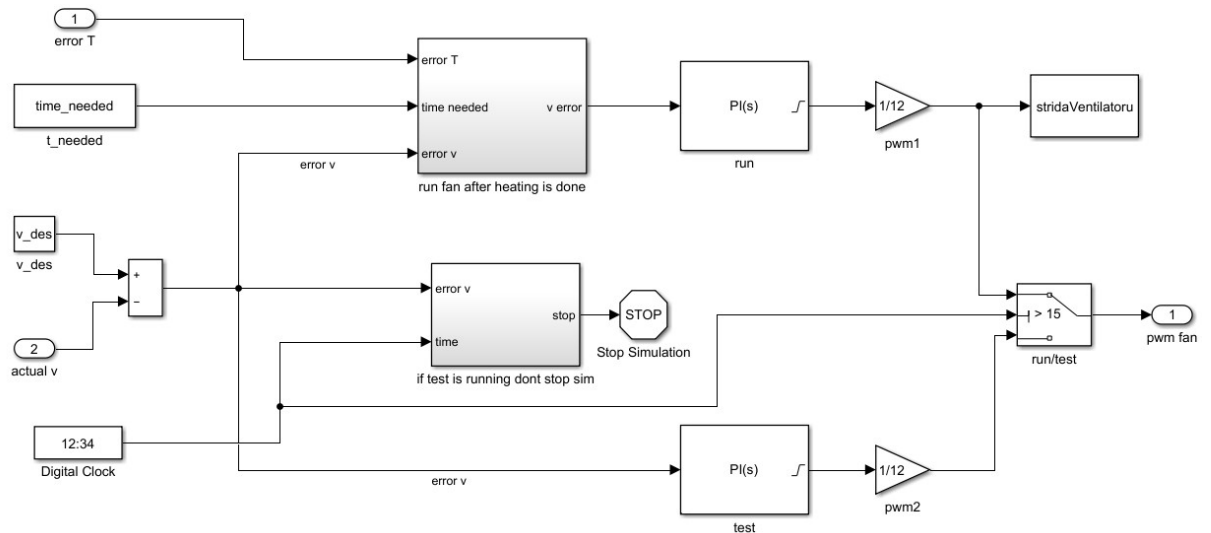
Obsah bločku *heatingControl* je na obr. 19. Topná tělesa jsou řízena pomocí ON/OFF regulace (zelený přepínač). Červený přepínač slouží k zastavení topení, pokud by kanál dosáhl teploty vyšší než 105 °C. Modrý přepínač dovolí zapnout topení až po uplynutí patnácti sekund od začátku měření (čas pro ustálení signálů z teploměru po zapnutí simulace).



Obr. 19 Řízení topných těles v Simulinku

### 5.4.3 Řízení ventilátoru

Řízení rychlosti proudění probíhá v bločku *fanControl* pomocí PI regulátoru (viz obr.20). Na začátku simulace je spuštěn testovací běh ventilátoru. Testovací běh trvá 15 sekund. Měřicí běh ventilátoru je spuštěn až po prohřátí kanálu na požadovanou teplotu. Toto je zaručeno bločkem *run after heating is done*, kde je signál *error*  $v$  (rozdíl mezi uživatelem požadovanou rychlostí a skutečnou rychlostí) vedoucí do PI regulátoru pozdržen o čas potřebný k prohřátí kanálu. Informace o času potřebném k prohřátí kanálu je uložena v proměnné *time\_needed* a je získána na začátku měření (viz kapitolu 5.2.1). Parametry regulátoru byly naladěny empiricky.



Obr. 20 Řízení ventilátoru v Simulinku

#### 5.4.4 Výpočet a zobrazení výsledků

Po prohřátí kanálu na požadovanou teplotu je spuštěn ventilátor. Ten běží po čas jedné minuty, která se ukázala jako dostačující čas pro ustálení teploty na výstupu z kanálu. Na konci této doby jsou změřená data uložena do workspace Matlabu a simulace je zastavena. Jelikož při testování docházelo u tlakoměrů ke kmitání měřených hodnot, zaznamenává se 30 hodnot, které se před výpočtem průměrují. Výpočet probíhá ve funkci *calculation.m*. Následně je spuštěna funkce *showResults.m*, která uživateli formou tabulky zobrazí výsledky měření viz obr. 21. Ty jsou automaticky uloženy spolu s dalšími údaji o měření do souboru *results.mat* umístěném v kořenovém adresáři funkce. Při dvou po sobě následujících měření je nutné první soubor s výsledky přejmenovat, jinak dojde k jeho přepsání novými hodnotami.

Measured data	
v [m/s]	8
alfa [W / m <sup>2</sup> K]	105
K [N s <sup>2</sup> / m <sup>8</sup> ]	9.4500e+06
f [-]	0.0270
Re [-]	1.0093e+04
Nu [-]	79.2000

Obr. 21 Zobrazení výsledků měření

## 6 TESTOVACÍ MĚŘENÍ

Testovací měření bylo provedeno s hladkým a drsným kanálem. Označení „hladký kanál“ v této kapitole neodpovídá teorii probírané v kapitole 3. Zde se jedná o pracovní označení pro účely měření (teoreticky se jedná o kanál drsný). Jako drsný kanál je zde označen kanál s umělou drsností vytvořenou vložením kroužků o menším vnitřním průměru tak, aby po délce kanálu opakovaně docházelo ke zúžení toku.

### 6.1 Hladký kanál

Kanál je seskládaný z kroužků o vnitřním průměru 20 mm. Jedná se o přiblížení se skutečnému chladicímu kanálu, který vzniká poskládáním statorových plechů ve stroji.

*Naměřené hodnoty:*

v [m/s]	7,0	8,0	10,0	11,0
alfa [W/m <sup>2</sup> K]	84	96	116	123
f	0,027	0,028	0,029	0,030
K	9,41E+06	9,68E+06	1,01E+07	1,02E+07

*Teoretické hodnoty:*

Při výpočtech hydraulických odporů kanálů skládaných ze statorových plechů se pro součinitel tření používá odhad v rozmezí 0,015 – 0,03. Odtud vztahem (4) dostaneme interval hydraulického odporu:

$$K_{\text{hladký, teor}} \in (5,21E+06 - 1,04E+07) \text{ N s}^2 \text{ m}^{-8}.$$

Součinitel přestupu tepla vypočtený dle vztahu (16) a korigovaný na délku a drsnost kanálu vztahy (18, 19):

v [m/s]	7,0	8,0	10,0	11,0
$\alpha_{\text{vyp}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	75	87	110	129

### 6.2 Drsný kanál

Pro vytvoření umělé drsnosti bylo do kanálu v rozestupech 29,5 mm umístěno devět kroužků plechu o vnitřním průměru 18 mm.

*Naměřené hodnoty:*

v [m/s]	7,0	8,0	9,9
$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> K]	133	141	167
f	0,059	0,061	0,077
K	2,04E+07	2,11E+07	2,64E+07

*Teoretické hodnoty:*

Takto sestavený kanál představuje dva odpory proudění. Prvním je opakované zúžení průtoku a jeho hodnota se určí vztahy (2, 5). Druhým je odpor třením a jeho hodnota je stejná jako u hladkého kanálu. Výsledný odpor kanálu je pak dán součtem těchto odporů:

$$K_{\text{drsný,teor}} = K_{\text{hladký,teor}} + 9 \cdot K_{\text{zúžení}} \quad (48)$$

Dosažením dostaneme interval:

$$K_{\text{drsný,teor}} \in (2,27\text{E}7 - 2,79\text{E}7) \text{Ns}^2\text{m}^{-8}.$$

Součinitel přestupu tepla vypočtený dle vztahu (16), který je dále korigován na délku a drsnost kanálu vztahy (18, 19):

$v$ [m/s]	7,0	8,0	9,9
$\alpha_{\text{vyp}}$ [W/m <sup>2</sup> K]	129	146	197

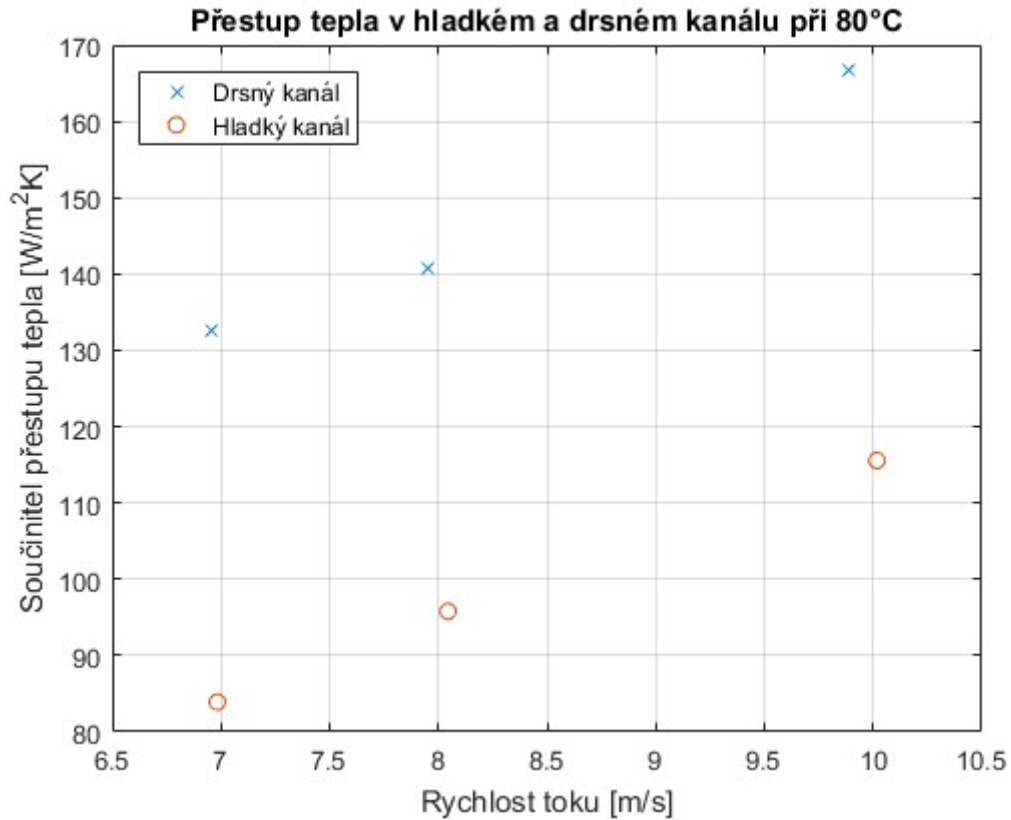
### 6.3 Porovnání naměřených hodnot

Zde jsou porovnány naměřené hodnoty s hodnotami teoretickými. Je na místě připomenout, že teoretické hodnoty pochází z empirických vzorců a slouží tak spíše jako odhad, tudíž jimi nelze zaručit přesný výsledek k porovnání (zvláště u krátkých kanálů). Změřený součinitel tření (a tím i hydraulický odpor) hladkého kanálu leží v předpokládaném intervalu hodnot, který se běžně pro tyto druhy kanálů používá.

U kanálu drsného již nemáme teoretických podkladů pro výpočet ekvivalentního součinitele tření, ale jsme schopni toto porovnání učinit na základě hydraulického odporu. Tento se pro rychlosti proudění 7 a 8 m/s nachází pod intervalem teoretických hodnot. Toto odpovídá poznatku v [1], že pro  $n$  opakovaných zúžení v kanálu je výsledný odpor o něco menší než by byl  $n$ -násobek odporu jednoho zúžení. Naměřený odpor při rychlosti 9,9 m/s se v předpokládaném intervalu již nachází.

Zajímavým poznatkem je skutečnost, že součinitel tření (hydraulický odpor) s rostoucí rychlostí proudění (tedy i Reynoldsovým číslem) také roste. Toto si odporuje s empirickými vztahy, podle kterých součinitel tření s roustoucím  $Re$  nejdříve klesá a poté od určité hodnoty  $Re$  je pro danou drsnost kanálu konstantní.

Měřené a vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla si přibližně odpovídají. Větší odchylku lze pozorovat pro drsný kanál při rychlosti 9,9 m/s. Ta může být způsobena neplatností vztahu pro vyšší drsnosti, což nelze prokázat, jelikož horní mez drsnosti, pro kterou lze vztahu použít, není běžně známa.



Obr. 22 Graf zobrazující závislost součinitele přestupu tepla pro hladký a drsný kanál na rychlosti toku při teplotě 80 °C

Graf na obr. 22 zobrazuje změřený součinitel přestupu tepla v hladkém a v drsném kanálu při střední teplotě kanálu 80 °C. Graf potvrzuje teoretický předpoklad zvýšení součinitele přestupu tepla při proudění v kanálu s větší drsností.

## 7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Výsledkem práce je dokončení návrhu experimentálního přípravku pro měření parametrů chladicích kanálů a jeho zprovoznění. Na zařízení lze nastavovat tyto parametry: rychlost proudění, střední teplotu kanálu a drsnost chladicího kanálu. Zařízením lze změřit součinitel přestupu tepla a součinitel tření/hydraulický odpor. Dále informuje o vlastnostech proudění (Reynoldsovo a Nusseltovo číslo).

Bylo provedeno testovací měření, jehož výsledky se shodují s teoretickými předpoklady. Teoretické předpoklady se ovšem zakládají na empirických vztazích získaných z měření na dlouhých kanálech o délce (100 až 150 D) a nelze z nich proto usuzovat na přesnost zařízení. Pro dosažení co nejvyšší přesnosti zařízení by bylo vhodné měřit průtok vzduchu přímo průtokoměrem, aby se zamezilo vlivu nejistot vzniklých při kalibraci clony. Je třeba počítat s tím, že průtokoměr (obsahuje ochranné síto) vnese do obvodu větší hydraulický odpor než trubice se clonou.

Dále by bylo vhodné přemístit místo pro měření statického tlaku pro účel měření odporu kanálu blíže chladicímu kanálu, aby při měření nebylo nutno kompenzovat vliv části obvodu mezi měřicím místem a chladicím kanálem, nebo aby tato kompenzace byla minimální.

Měřicí rozsah rychlostí je 5 – 12 m/s pro chladicí kanál bez umělé drsnosti. Zvýšení rozsahu je možno dosáhnout použitím výkonějšího ventilátoru. Horní mez nastavitelné teploty kanálu je nyní omezena kalibrací teplotních čidel a polystyrenovou izolací (tato byla při 100 °C testována - bez potíží). Zkalibrováním čidel i pro teploty nad 100°C a použitím korku pro zlepšení vlastností izolace lze rozsah měřených teplot zvýšit.

Při testování bylo zjištěno, že chladicí kanál se neohřívá rovnoměrně, nýbrž na koncích má nižší teplotu než uprostřed. Pro regulaci teploty je použita průměrná hodnota teploty kanálu, což má za následek až 8% odchylku teplot jednotlivých částí kanálu od požadované teploty. Možným řešením je vylepšení izolace na koncích kanálu.

## 8 ZÁVĚR

Začátek práce (kapitola 3) je věnován seznámení se s problematikou ventilačních výpočtů elektrických strojů a to především výpočtů týkajících se chladicích kanálů. Značná část těchto výpočtů je založena na empirických vztazích získaných četnými experimenty. Těmito vztahy lze získat přibližné výsledky, které je v praxi často nutno dodatečně korigovat.

Hlavní část práce (kapitola 5) se věnuje praktickému návrhu experimentálního zařízení určeného pro měření součinitele přestupu tepla a součinitele tření různých konfigurací chladicího kanálu. Při návrhu bylo využito některých již existujících komponent, čímž došlo k urychlení návrhu a zefektivnění práce. Ovládání zařízení je zprostředkováno měřicí kartou Humusoft MF624 a softwarem Matlab/Simulink.

Funkčnost zařízení je ověřena testovacím měřením (kapitola 6). K testování byl použit kanál o drsnosti dané klasickou konstrukcí kanálu (seskládané plechy) a kanál s uměle vytvořenou drsností vzniklou vložením několika plechů o menším vnitřním poloměru. Naměřené hodnoty na obou kanálech se z větší části shodují s hodnotami získanými teoretickým výpočtem.

Na konci práce jsou doporučena některá vylepšení, na která již nezbýval čas a která by mohla přispět ke zvýšení přesnosti a měřicího rozsahu zařízení.

Výsledkem je funkční zařízení, použitelné pro měření účinnosti chladicích kanálů. Rozsah nastavitelné rychlosti proudění se liší podle velikosti hydraulického odporu měřeného kanálu. Pro kanál bez umělé drsnosti se jedná o interval 5 – 12 m/s. Maximální teplota kanálu pro měření je 100 °C. Rozsah měřitelné rychlosti i teploty lze dalšími úpravami zařízení zvýšit.

## 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973.
- [2] ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [3] VLACH, Radek. *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4.
- [4] IDEL'CHIK, I. E. *Handbook of hydraulic resistance: coefficients of local resistance and of friction*. Springfield, Va.: U.S. Dept. of Commerce, Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information [distributor], 1966.
- [5] *User's manual - MF 624 multifunction I/O card*.  
Dostupné z: <<http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/mf624um.pdf>>
- [6] Vorel P., Patočka M. *Průmyslová elektronika*. Elektronické skriptum FEKT VUT Brno, 2007.
- [7] *MATLAB Documentation* [online]  
Dostupné z: <<https://www.mathworks.com/help/>>
- [8] Frk M., Rozsivalová Z. *Přehled, přesnost a citlivost teplotních senzorů v praxi*. [online]  
Dostupné z: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/download/prehled--presnost-a-citlivost-teplotnich-senzoru-v-praxi/>>
- [9] SANYO DENKI *SanAce 40 9HV Manual* [online]  
Dostupné z:  
<[http://www.farnell.com/datasheets/1958093.pdf?\\_ga=2.127936588.1368423008.1519327997-24429499.1518545734](http://www.farnell.com/datasheets/1958093.pdf?_ga=2.127936588.1368423008.1519327997-24429499.1518545734)>
- [10] *Differential Pressure Transmitter with Field-Selectable Ranges* [online]  
Dostupné z: <<https://www.omega.com/pressure/pdf/PX277.pdf>>
- [11] *Low Pressure Sensors PX274, PX275, PX277, PX278 Manual* [online]  
Dostupné z: <<https://www.omega.com/Manuals/manualpdf/M2759.pdf>>

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Kontrakční součinitel pro náhlý kruhový přechod a úzkou šterbinu [1].....	18
Obr. 2 Průběhy činitelů tření $\lambda$ a $f = \lambda/4$ v závislosti na Re a na $e/D$ pro kanály kruhového průřezu podle Colebrooka; $L_k$ pro kruhový, $L_1$ pro čtvercový průřez v laminárním oboru. Křivka podle 32 platí pro hladké kanály. Křivka 34 udává hranici, od které přestávají činitele tření v drsných kanálech záviset na Re.[1].....	19
Obr. 3 Schéma výpočtu součinitele přestupu tepla .....	24
Obr. 4 Experimentální zařízení.....	25
Obr. 5 Chladicí kanál.....	26
Obr. 6 Plechový kroužek pro konstrukci chladicího kanálu.....	26
Obr. 7 Odpor v hydraulickém obvodu zařízení .....	26
Obr. 8 Pracovní bod ventilátoru (vlevo pQ charakteristika hydraulického obvodu zařízení, vpravo zatěžovací charakteristika ventilátoru SanAce40 [9] .....	27
Obr. 9 Schéma clony pro měření průtoku [1].....	27
Obr. 10 Graf závislosti průtoku na rozdílu statického tlaku na cloně .....	28
Obr. 11 Schéma k odvození vztahu pro výpočet hydraulického odporu kanálu .....	28
Obr. 12 Měření odporu trubky a výstupu .....	29
Obr. 13 Graf závislosti hydraulického odporu trubice (pro potřeby měření h. odporu kanálu).....	29
Obr. 14 Schematické vyjádření ohřevu kanálu (vlevo) a řešení pomocí tepelných odporů (vpravo).....	30
Obr. 15 Schéma zapojení čidla Pt <sub>100</sub> .....	31
Obr. 16 Nastavení měřicího rozsahu tlakoměru [10] .....	33
Obr. 17 Model v Simulinku pro měření .....	34
Obr. 18 Uživatelské prostředí měřicího programu .....	35
Obr. 19 Řízení topných těles v Simulinku.....	35
Obr. 20 Řízení ventilátoru v Simulinku .....	36
Obr. 21 Zobrazení výsledků měření .....	36
Obr. 22 Graf zobrazující závislost součinitele přestupu tepla pro hladký a drsný kanál na rychlosti toku při teplotě 80 °C.....	39

# 11 SEZNAM PŘÍLOH NA CD

## vlastní

### kalibrace

- kalibrace\_tlak\_55\_odpor.xlsx (data z kalibrace tlakoměru 55)
- kalibrace\_tlak\_56\_clona.xlsx (data z kalibrace tlakoměru 56)
- kalibraceClony.m (skript pro vyhodnocení kalibrace clony)
- kalibraceClonyData.mat (data z kalibrace clony)
- kalibraceOdporKonceTrubky.m (skript pro vyhodnocení dat z kalibrace odporu konce trubky)
- kalibraceOdporKonceTrubkyData.mat (data z kalibrace odporu konce trubky)
- kalibraceTeploty.xlsx (data z kalibrace teploměru)

### merení

- obsahem jsou naměřená data spolu se skripty, které slouží k výpočtu teoretických hodnot k porovnání, vysvětleno souboru ctimne.txt

### mericiSW

- calculation.m (skript pro výpočet dat)
- heatingTime.m (skript pro výpočet doby ohřevu kanálu)
- listen.m (skript zaručující komunikaci mezi Simulinkem a GUI)
- mainFig\_v2.fig
- mainFig\_v2.m (GUI – hlavní program)
- measurement.slx (měřicí model)
- results.mat (výsledky posledního měření)
- showResults.fig
- showResults.m (GUI pro zobrazení výsledků)

### vypočty

- pQCharakteristikaKanalů.m (výpočet a vykreslení pQ charakteristiky hydr. obvodu)
- vypočtyOdporuProudění.m (výpočet odporů hydr. obvodu)
- mernaTepelnaKapacita.xlsx (proložení dat z [1] polynomem pro účely výpočtu)

## prevzate

- Clona3\_prevzate.stl (model měřicí clony)
- teplomer\_prevzate.brd (DPS teploměru)
- teplomer\_prevzate.sch (schéma teploměru)