

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

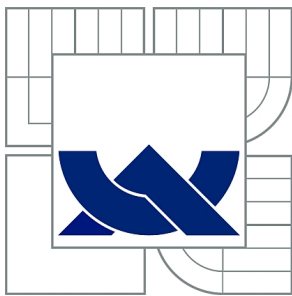
NÁVRH REGULACE TEPLoty VÝKONOVÉ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO  
RADIOVÝ PŘENOS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

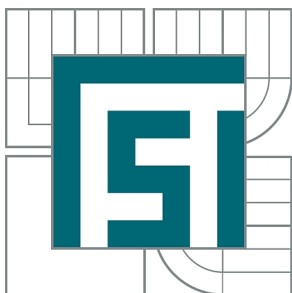
ONDŘEJ LAGA

BRNO 2013



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A**  
**BIOMECHANIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## **NÁVRH REGULACE TEPLoty VÝKONOVÉ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ PRO RADIOVÝ PŘENOS**

DESIGN OF TEMPERATURE CONTROL OF POWER ELECTRONIC ELEMENT OF DEVICE FOR  
RADIO TRANSMISSION

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**ONDŘEJ LAGA**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D.**

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2012/2013

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Ondřej Laga

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

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 regulace teploty výkonové části zařízení pro radiový přenos**

v anglickém jazyce:

#### **Design of temperature control of power electronic element of device for radio transmission**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cíl práce je zejména prakticky zaměřený na realizaci regulace ventilátoru zajišťující udržování teploty elektroniky v požadovaných mezích, což je nezbytné pro správný přenos radiových vln z příslušného zařízení.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešeršní studie regulace teploty
2. Návrh regulace
3. Realizace regulace
4. Ověření regulace na reálném zařízení

Seznam odborné literatury:

- [ 1 ] Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Skripta. VUT Brno, 2009.
- [ 2 ] Idelčik, I.E.: Handbook of Hydraulic Resistance, 3rd Edition, New York, US, 2006.
- [ 3 ] Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: Fundamental of Thermal-fluid Sciences. 3rd edition. McGraff Hill: Anstralia & New Zeland, 2008.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.11.2012

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá řešením problému přehřívání výkonových zařízení pro radiový přenos, konkrétně vysílacích elektronek, které často dosahují při maximálním provozu příliš vysokých teplot. Jedná se o návrh regulace teploty na tomto zařízení.

## **Abstract**

This work deals with the problem of overheating power devices for radio transmission, namely transmitting vacuum tubes, which often reach a high temperature by the maximum operating of this. This is the design of temperature control for this device.

## **Klíčová slova**

Tepelné procesy, Radiový přenos, Regulace teploty, SimMechanics, SimScape, Parameter Estimation

## **Keywords**

Thermal processes, Radio transmission, Temperature control, SimMechanics, SimScape, Parameter Estimation

## **Bibliografická citace**

LAGA, O. *Návrh regulace teploty výkonové části zařízení pro radiový přenos*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 35 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Radek Vlach, Ph.D..

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Návrh regulace teploty výkonové části zařízení pro radiový přenos“ vypracoval samostatně, pouze s použitím uvedených zdrojů odborné literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce.

24. května 2013

.....  
Laga Ondřej

## **Poděkování**

Velmi rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Radku Vlachovi, PhD za vedení, podnětné připomínky a cenné rady při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům Fakulty strojního inženýrství za znalosti a praktické rady, které mi předali. V neposlední řadě patří poděkování i těm, kteří mě při studiu podporovali.



---

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE</b> .....	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>REŠERŠNÍ STUDIE</b> .....	<b>12</b>
3.1	Tepelné procesy .....	12
3.1.1	Základní vztahy termomechaniky .....	12
3.1.2	Sdílení tepla .....	13
3.1.3	Přestup tepla .....	16
3.1.4	Tepelné odpory .....	18
3.2	Regulátory .....	20
3.2.1	Spojité a sdružené regulátory .....	20
3.2.2	Regulační soustava 1. řádu .....	22
3.2.3	Metody nastavení parametrů regulátorů .....	23
<b>4</b>	<b>VÝPOČTOVÝ MODEL</b> .....	<b>25</b>
4.1	Sestavení matematického modelu .....	25
4.2	Model v programu Matlab Simulink .....	26
4.3	Model v prostředí SimScape .....	27
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ DAT</b> .....	<b>29</b>
5.1	Měření v reálném čase .....	29
5.2	Zhodnocení měření .....	32
5.3	Verifikace výpočtového modelu .....	32
<b>6</b>	<b>NÁVRH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>34</b>
6.1	Regulace teploty .....	34
6.2	Schéma zapojení .....	34
6.3	Konstrukce .....	36
6.4	Ověření funkčnosti .....	38
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b> .....	<b>41</b>
<b>10</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b> .....	<b>42</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>43</b>

---

# 1 Úvod

Zvládnout navrhnout regulaci jakékoliv teploty zařízení popřípadě teploty prostředí se dařilo už i našim předkům. K tomuto systému používali jednodušší regulace, než fungují v této moderní době. Například lepší větrání (proudění vzduchu), tvoření přirozeného proudění pomocí určitých pomůcek atd. V současné době si můžeme regulaci teploty představit o něco složitěji. Regulují se výkony zdrojů tepelné energie, regulace teplot topného média, regulace průtoku chladiva systémem a další takové metody.

V našem případě se bude regulovat průtok vzduchu přes chladič výkonové elektroniky pro radiový přenos, konkrétně elektronky, která bude nerovnoměrně zatěžována. Z důvodu tohoto zatěžování docházelo k následnému přehřívání a pak ke zničení této výkonové elektroniky.

Takto vznikla myšlenka na vytvoření regulátoru teploty, který bude zabráňovat přehřívání, popřípadě následné poškození elektronky. Vize tkví v návrhu regulace a udržení určené konstantní a hlavně bezpečné hodnoty teploty pro správný chod radiového přenosu. Proto je vhodné si nasimulovat soustavu v PC a předejít tak reálným problémům. Poté se zkonstruuje reálný regulátor a je ho pak nutno vyzkoušet na reálném zařízení simulovaném topnou patronou a ventilátorem a měřit jednotlivé teploty v různých místech zařízení. Výsledné měření a hodnoty budou zapsány a zobrazeny do grafů a výsledky zhodnoceny.

---

## 2 Cíl práce

Cíl práce je zejména prakticky zaměřený na realizaci regulace ventilátoru zajišťující udržování teploty elektronky v požadovaných mezích, což je nezbytné pro správný přenos radiových vln z příslušného zařízení. Jednotlivé cíle, které je potřeba splnit jsou:

- Rešeršní studie regulace teploty
- Návrh regulace
- Realizace regulace
- Ověření regulace na reálném zařízení

---

## 3 Rešeršní studie

### 3.1 Tepelné procesy

Tepelné procesy vychází obecně ze zákonů termomechaniky, která se zabývá procesy, vlastnostmi látek, přeměnou tepelné energie, přijímáním či odváděním tepla do okolí a tepelnými jevy. Za tepelný proces si můžeme také představit sdílení tepla vedením, konvekcí či zářením.

#### 3.1.1 Základní vztahy termomechaniky

„Teplo  $E$  je zvláštní druh energie. Množství tepla přivedeného nebo odvedeného látky o hmotnosti  $m$  a měrném teple  $C$  při rozdílu teplot  $\Delta t$  je určen vztahem:

$$E = m \cdot C \cdot \Delta t \quad (1)$$

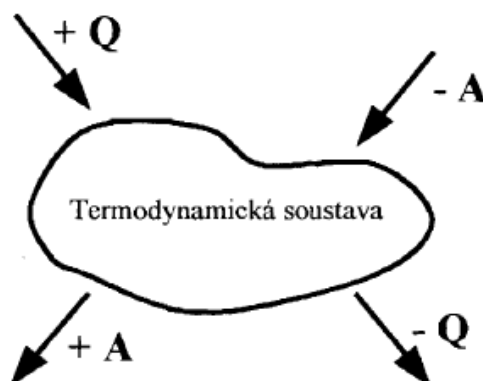
Měrné teplo  $C$  je množství tepla, které je nutno přivést látce o hmotnosti 1kg, aby se ohřála o  $1^\circ\text{C}$  nebo 1K. U většiny látek se stoupající teplotou měrné teplo roste, v technických výpočtech se proto užívá tzv. střední měrné teplo v daném intervalu. Měrné teplo směsi a látek je určeno vztahem:“ [1]

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (2)$$

##### 3.1.1.1 Termodynamická soustava

Termodynamickou soustavu si můžeme představit jako imaginární kontrolní prostor o nějakém vymezeném kontrolním objemu (obr. 1). Tento prostor je vymezen určitým množstvím látek (hmotným prostředím). Vše co je mimo tento prostor se nazývá okolí.

V termodynamické soustavě probíhají termodynamické děje, při kterých dochází k výměně látek a energií. Výměnu látek definujeme jako toky energie mezi soustavou a okolím, například práce  $A$  a teplo  $Q$  (mění se též hmotnost soustavy).



Obr. 1: Termodynamická soustava + znaménkové konvence, převzato z [6]

---

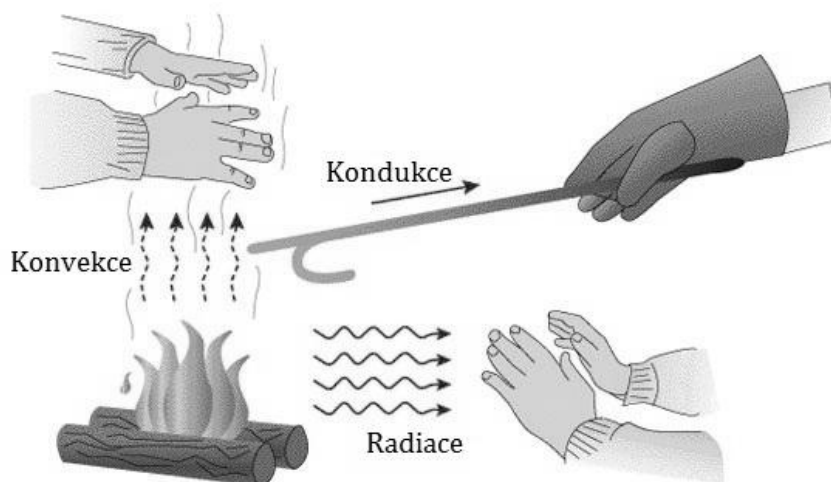
Soustavy rozdělujeme na dva druhy, *izolovanou* a *neizolovanou*. Jestliže nedochází k výměně tepla mezi prostorem a okolím, nazýváme ji izolovanou. Pokud teplo i práce přestupuje, soustava je neizolovaná nebo může být částečně izolovaná.

Podle toho, zda přes hranice soustavy prochází aspoň částečně práce nebo teplo, dělíme termodynamické soustavy ještě dále na *otevřené* a *uzavřené*.

### 3.1.2 Sdílení tepla

U tepelných procesů se teplo sdílí pomocí vedení v tělesech, uvolňováním tepla v látkách popřípadě výměnou tepla. Základní typy sdílení tepla jsou:

- kondukce (vedení tepla)
- konvekce (přenos pohybem média)
- radiace (záření, sálání)



Obr. 2: Základní typy sdílení tepla

#### 3.1.2.1 Kondukce

Kondukce neboli vedení tepla je popsána Fourierovou diferenciální rovnicí. Aby docházelo k vedení tepla v tělese, je nutná podmínka rozdílu teploty (gradientu).

$$q_V = -\lambda \cdot S \cdot \text{grad } t \quad (3)$$

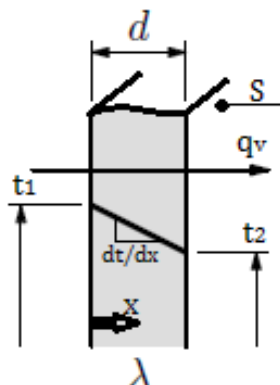
Po úpravě dostáváme vztah pro jednorozměrné proudění ve směru osy  $x$  (obr. 3):

$$q_V = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

kde  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti materiálu,  $S$  je obsah plochy, přes níž kondukce probíhá. Pokud si představíme, že je deska homogenní, izotropní a proudí teplo jen kolmo k povrchovým plochám, pak je velikost tepelného toku  $q_V$

dána vztahem:

$$q_V = \frac{\lambda}{d} \cdot S \cdot (t_1 - t_2) \quad (5)$$



Obr. 3: Průchod tepla jednoduchou rovinnou stěnou, převzato a upraveno z [4]

### 3.1.2.2 Konvekce

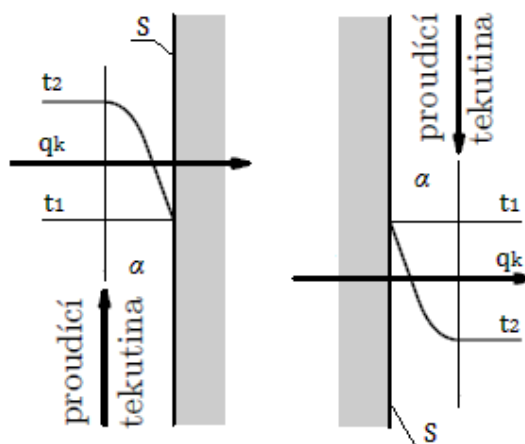
„Ke sdílení (přenosu) tepla prouděním dochází například při styku kapaliny nebo plynu s pevnou stěnou, či naopak. Při tom dochází k ochlazení nebo ohřívání tenké vrstvy tekutiny při stěně (podle toho, je-li teplota stěny vůči tekutině vyšší nebo nižší). Vzniklý rozdíl teplot vrstev pak způsobuje přirozené proudění (obr. 4).“ [4]

Proudění nemusí být vždy přirozené, ale i nucené (umělé). V tomto případě je pohyb látky nucen například ventilátorem, obecně však vnějším tlakovým rozdílem.

Rovnice, která vyjadřuje vztah pro tepelný tok tvořený prouděním:

$$q_P = \alpha \cdot S \cdot \Delta t \quad (6)$$

kde  $S$  označuje plochu chladicí stěny,  $\Delta t$  rozdíl teplot ochlazované (ohřívané) látky a  $\alpha$  součinitel přestupu tepla.



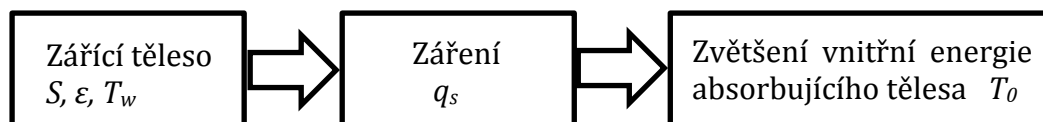
Obr. 4: Sdílení tepla prouděním. Sdílení tepla z tekutiny do stěny (vlevo), ze stěny do tekutiny (vpravo), převzato a upraveno z [4]

---

### 3.1.2.3 Radiace

Radiace či záření jsme schopni pozorovat na jakémkoliv povrchu tělesa, které má určitou teplotu. Z tohoto tělesa je vyzařována energie ve formě elektromagnetických vln do prostoru, který těleso obklopuje – tento proces můžeme nazvat sáláním.

Schematicky lze tento děj znázornit takto:



Obr. 5: Schéma záření z povrchu těles

Odrazivost a pohltivost záření závisí i na povrchu a barvě povrchu tělesa. Jako příklad si můžeme představit chladničky – bílý povrch záření nejefektivněji odráží. Pokud ale chceme, aby se záření co nejvíce odráželo, použijeme černé povrchy.

Pokud bychom chtěli určit výkon vyzařujícího předmětu, označíme jej jako  $q_s$  ve watttech,  $S$  obsah plochy povrchu tohoto předmětu v  $m^2$  a  $T_w$  teplotu předmětu v kelvinech, tak platí:

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot T^4 \quad (7)$$

V reálných situacích však nastává stav, kdy předmět o teplotě povrchu  $T_w$  vyzařuje energii do svého okolí a současně energii z okolí o teplotě  $T_0$ . Pak celkový tepelný tok, který je z povrchu  $S$  emitován, je dán tzv. Stefan-Boltzmannovým vztahem:

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_w^4 - T_0^4) \quad (8)$$

kde  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$  je tzv. Stefanova-Boltzmannova konstanta,  $\varepsilon$  označuje emisivitu předmětu, která nám říká, jak je efektivní záření z povrchu  $S$  v porovnání s černým tělesem (teoretický model), nebo s dokonalým zářičem. Hodnota  $\varepsilon$  závisí na materiálu či barvě tělesa a platí  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Je-li  $\varepsilon = 1$ , hovoříme o černém tělese.

Při přepočtu mezi teplotou  $T$  v kelvinech a teplotou  $t$  ve stupních Celsia vyjdeme ze vztahu:

$$T = t + 273,15 \quad (9)$$

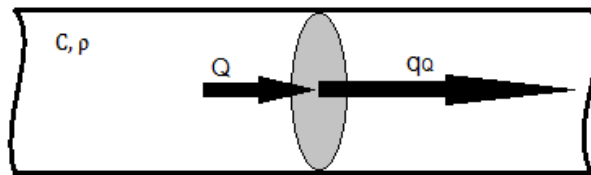
---

### 3.1.2.4 Teplo v toku chladiva

„Při stanovení tepla v toku chladiva se vychází ze vztahu (1). Teplo v proudící tekutině (obr. 6) o průtoku  $Q$  a teplotě  $t_Q$  je popsán vztahem:

$$q_Q = \frac{dE}{dt} = \frac{d(C \cdot m \cdot t_Q)}{dt} = C \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt} \cdot t_Q = \rho \cdot C \cdot Q \cdot t_Q \quad (10)$$

Výše uvedený vztah udává rovněž souvislost mezi tepelným tokem a teplotou tekutiny. Součinitel úměrnosti zde závisí na množství látky  $Q$  a na měrném teple  $C$ .“[1]



Obr. 6: Teplo v toku chladiva, upraveno z [1]

### 3.1.3 Přestup tepla

U výpočtu součinitele přestupu tepla rozhoduje o výsledku především mnoho faktorů, zejména způsob či druh proudění, tvar tělesa, teplota chladiva nebo vliv okolního rušení atd.

#### 3.1.3.1 Radiace

„Tepelný tok sáláním je značně závislý na teplotě povrchu tělesa i okolí, dále na emisivitě a také na tvaru a uspořádání tělesa. Vztah (8) se z důvodů jednotnosti často upravuje na tvar (6). Porovnáním vztahů (6) a (8) a s využitím základních matematických operací se dospěje ke vztahu pro vyjádření součinitele přestupu tepla:“[1]

$$\alpha_s = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^2 + T_0^2) \cdot (T + T_0) \quad (11)$$

#### 3.1.3.2 Přirozená konvekce

Přirozená konvekce je definována přirozeným prouděním tepla do okolního vzduchu vlivem vztlakových sil. Tato situace nastává, pouze pokud je teplota povrchu tělesa vyšší než teplota okolí. Přestup tepla konvekcí nám udává střední součinitel přestupu tepla  $\alpha_k$ . Lze jej vyjádřit vztahem:

$$\alpha_k = C_K \cdot \sqrt[4]{t - t_0} \quad (12)$$

kde  $C_K$  je součinitel tvaru (konvekce), který je závislý na tvaru, velikosti ale také poloze tělesa vzhledem k vektoru tíhového zrychlení  $g$ .



V následující tabulce jsou vybrány nejčastější tvary těles a k nim určené součinitele:

Tab. 1: Součinitel konvekce vybraných tvarů těles [1]

Typ tělesa	Vztah pro součinitel konvekce	Omezující podmínky
vodorovný válec (dlouhý) průměru $D$	$C_K = 1,315 \cdot \sqrt[4]{D}$	$D \leq 0,25$
	$C_K = 1,05 \div 1,2 \sqrt[4]{D}$	$D > 0,25$
svislé rovinné desky výšky $H$	$C_K = 1,365 \cdot \sqrt[4]{H}$	$H \leq 0,3$
	$C_K = 1,78$	$H > 0,3$
rovinná plocha (čtvercová) o straně $L$ chlazená směrem nahoru	$C_K = 1,315 \cdot \sqrt[4]{L}$	$L \leq 0,3$
	$C_K = 2,5$	$L > 0,3$
rovinná plocha (čtvercová) o straně $L$ chlazená směrem dolů	$C_K = 0,59 \cdot \sqrt[4]{L}$	$L \leq 0,3$
	$C_K = 1,315$	$L > 0,3$

### 3.1.3.3 Nucená (umělá) konvekce

„Součinitel přestupu tepla zahrnuje četné případy podle toho, jde-li o proudění turbulentní, laminární nebo smíšené (přechodné) a podle toho, jde-li o odvod tepla z kanálů, z ovívaných stěn, z tělesa v proudu vzduchu atd.“ [1]

Pro vyjádření přestupu tepla se nejčastěji používají bezrozměrné veličiny na základě tzv. teorie podobnosti. Nejčastěji používané podobnostní čísla jsou např. Reynoldsovo a Nusseltovo číslo:

$$Re = D \cdot \frac{v}{\nu} \quad (13)$$

kde  $v$  je rychlost proudění,  $D$  je průměr kruhového kanálu a  $\nu$  kinematická viskozita.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (14)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla,  $D$  je průměr kruhového kanálu (v případě nekruhového kanálu se uvažuje hydraulický průměr  $D_H$ ) a  $\lambda$  je měrná tepelná vodivost chladiva.

Z výše uvedených podobnostních čísel lze určit obecný vztah pro určení součinitele přestupu tepla  $\alpha_t$  pro turbulentní proudění:

$$\alpha_t = k \cdot \sqrt[5]{\frac{v^4}{D}} \quad (15)$$

kde  $v$  střední rychlost proudění chladiva,  $D$  je průměr kanálu a  $k$  je konstanta, která je dána určitým chladivem, teplotou a přetlakem v systému.

---

### 3.1.4 Tepelné odpory

Tepelný odpor je nutný při popisování některých tepelných procesů. „Mezi dvěma rozdílnými teplotními potenciály je tepelnému toku kladen určitý odpor. Tepelný tok je pak možné vyjádřit obdobou Ohmova zákona ( $I \sim q$ ,  $U \sim \Delta t$ ,  $R \sim R_t$ )“ [1]

$$q = \frac{\Delta t}{R_t} \quad (16)$$

Po úpravě tohoto vztahu dostáváme vztah pro tepelný odpor:

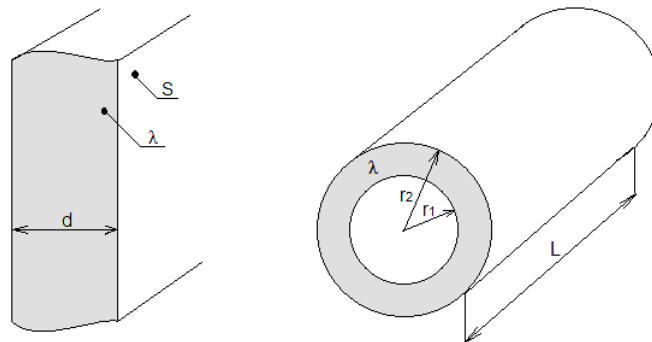
$$R_t = \frac{\Delta t}{q} \quad (17)$$

kde  $R_t$  je tepelný odpor,  $\Delta t$  je rozdíl teplot mezi kterými tepelný odpor určujeme a  $q$  je tepelný tok soustavou.

#### 3.1.4.1 Tepelné odpory při kondukcí

Kondukcí neboli vedení tepla může probíhat přes různé tvary stěn či materiálů. Nejčastější tvary stěn pak můžeme rozdělit na:

- rovinné
- válcové
- kulové



Obr. 7: Jednorozměrné vedení tepla. Vlevo rovinná rozlehlá stěna, vpravo jednoduchá válcová stěna, upraveno z [1]

Pro určení tepelného odporu rovinnou stěnou (jednorozměrné vedení) platí tento vztah:

$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda \cdot S} \quad (18)$$

Podle (17) je možné psát vztah pro odpor válcové stěny:

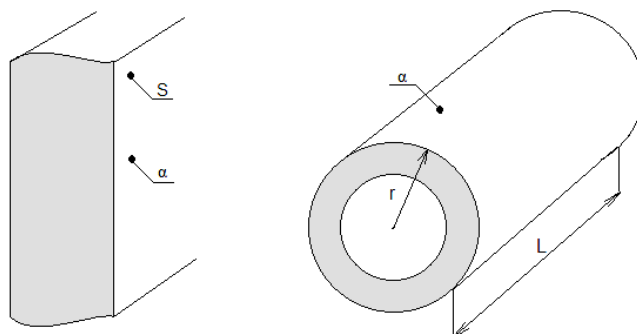
$$R_\lambda = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda \cdot 2\pi \cdot L} \quad (19)$$

kde  $L$  je délka tělesa (nejčastěji trubky),  $r_1$  a  $r_2$  je vnitřní a vnější průměr válce. Dalším typem stěny je stěna kulové nádoby. Obvykle lze určit tepelný odpor dle vztahu:

$$R_\lambda = \frac{r_2 - r_1}{4\pi \cdot r_2 \cdot r_1 \cdot \lambda} \quad (20)$$

### 3.1.4.2 Tepelné odpory při konvekci

U konvekce dochází při proudění chladiva mezi chlazenou stěnou a okolím také k rozdílům tepelných odporů. Především vlivem různých tvarů těles. Zde lze dělit tedy stěny stejným způsobem jako (3.1.4.1). Rovinné, válcové a kulové.



Obr. 8: Stěny, u nichž dochází k proudění chladiva. Vlevo rovinná rozlehlá stěna, vpravo jednoduchá válcová stěna, upraveno z [1]

Pro rovinnou, válcovou a kulovou stěnu platí následující vztahy:

$$R_\alpha = \frac{1}{\alpha \cdot S} \quad (21)$$

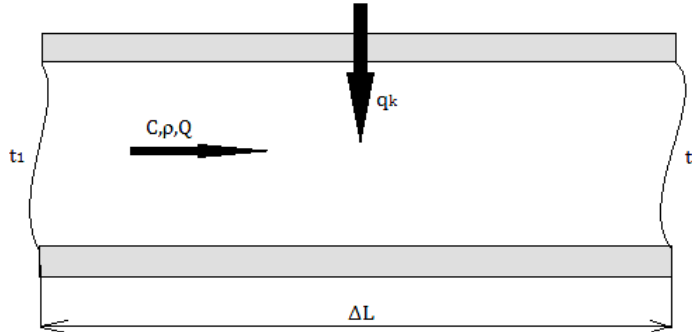
$$R_\alpha = \frac{1}{2\pi \cdot r \cdot \alpha \cdot L} \quad (22)$$

$$R_\alpha = \frac{1}{4\pi \cdot r^2 \cdot \alpha} \quad (23)$$

---

### 3.1.4.3 Tepelný odpor proudu chladiva

„Při výpočtech velmi často potřebujeme stanovit teplotu na výstupu z potrubí nebo v nějakém jiném průřezu. Takový výpočet nám může usnadnit znalost tepelného odporu proudu chladiva.“[1]



Obr. 9: Část potrubí s tepelným tokem konvekcí přes stěnu, převzato z [1]

Pokud si představíme část potrubí, do kterého proudí chladivo o měrném teple  $C$ , hustotě  $\rho$  a průtoku  $Q$  při určité teplotě  $t_1$ . Z takovéto soustavy vystupuje teplota chladiva  $t_2$ . Přes stěnu potrubí ještě do soustavy vstupuje tepelný tok konvekcí. Z těchto výše uvedených veličin jsme schopni na základě prvního zákona termodynamiky sestavit energetickou bilanci systému:

$$q_k = C \cdot \rho \cdot Q \cdot (t_2 - t_1) = C \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta t \quad (24)$$

Pokud porovnáme obecný vztah pro tepelný odpor (17) dostaneme vztah pro tepelný odpor proudu chladiva:

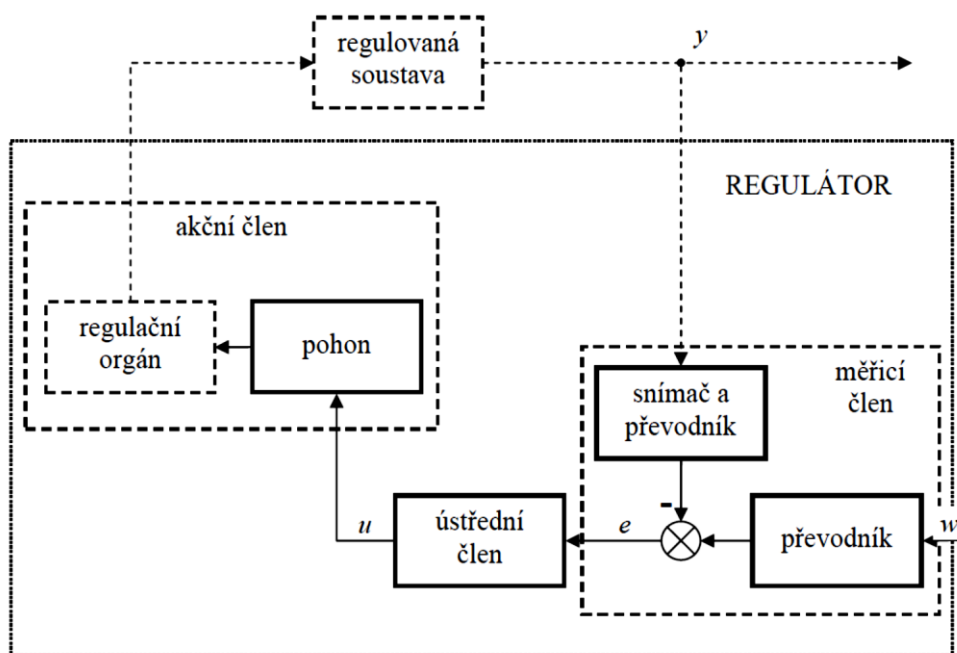
$$R_Q = \frac{1}{\rho \cdot C \cdot Q} \quad (25)$$

## 3.2 Regulátory

### 3.2.1 Spojité a sdružené regulátory

„Hlavním úkolem regulátoru je prostřednictvím akční veličiny působit na regulovanou soustavu, tak aby se regulovaná veličina udržovala na předepsané hodnotě a regulační odchylka byla nulová nebo co nejmenší. Působením poruchové veličiny  $v$  se změní regulovaná veličina  $y$  a odchýlí se od žádané hodnoty  $w$ . Tím vznikne regulační odchylka  $e = w - y$ , kterou odstraňuje regulátor svým zásahem prostřednictvím akční veličiny  $u$ . Zapojení obvodu je se zpětnou vazbou, tím regulátor zmenšuje regulační odchylku. Jestliže je regulační odchylka nulová, je na jeho výstupu nula a regulátor je bez funkce.

Regulátor se skládá z prvků zobrazených na obr. (10). Jedná se o měřicí člen, ústřední člen a akční člen.“[8]



Obr. 10: Schéma regulátoru, převzato z [8]

Měřicí člen obsahuje převodník řídicí veličiny, snímač s převodníkem a sumátor (porovnávací člen). Snímač si můžeme představit jako nějaké čidlo, které měří určitou fyzikální veličinu. Čidlo je vybaveno převodníkem, který převádí měřenou veličinu na napětí či proud. Z měřicího členu vystupuje regulační odchylka.

Člen, který zpracovává regulační odchylku, je ústřední člen. Odchylku může zesilovat, derivovat popřípadě integrovat. Při návrhu regulátoru se nejčastěji mluví o ústředním členu, který můžeme volit. Ústřední člen lze dělit na regulátor:

- **Proporcionální (P)**

Tento typ je nejjednodušší forma regulátoru a funguje jako zesilovač regulační odchylky. Regulační odchylka je přímo úměrná akční veličině. U tohoto typu regulace se jeho přechodová charakteristika ustálí v krátkém čase.

- **Integrační (I)**

Integrační regulátor lze použít v případě, když má regulační soustava velkou setrvačnost nebo nejsou příliš časté poruchy. Tento typ regulátoru úplně odstraňuje regulační odchylku  $e$  (tato odchylka se integruje).

- **Derivační (D)**

Samostatný derivační regulátor musíme kombinovat pouze s proporcionálním či integračním regulátorem, protože tento regulátor nedokáže sám zesilovat regulační odchylku. Derivační regulátor v těchto kombinacích dokáže zrychlit regulaci a zvýšit stabilitu systému.

- **Proporcionálně integrační (PI)**

PI regulátor je nejrozšířenější mezi všemi kombinacemi regulací. Výhoda u tohoto typu spočívá v možnosti nastavení parametrů zesílení a integrační časové konstanty. Tento regulátor je schopen úplně odstranit regulační odchylku.

- **Proporcionálně derivační (PD)**

- **Proporcionálně integrační derivační (PID)**

Tab. 2: Dynamické vlastnosti spojitéch regulátorů[8]

Typ regulátoru	Rovnice	Přenos $G_R(s)$	
<b>P</b>	$u(t) = r_0 e(t)$	$r_0$	$r_0$
<b>I</b>	$u(t) = r_{-1} \int e(t) dt$	$\frac{r_{-1}}{s}$	$\frac{r_0}{T_i s}$
<b>D</b>	$u(t) = r_1 e'(t)$	$r_1 s$	$r_0 T_d s$
<b>PI</b>	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s}$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$
<b>PD</b>	$u(t) = r_0 e(t) + r_1 e'(t)$	$r_0 + r_1 s$	$r_0 (1 + T_d s)$
<b>PID</b>	$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int e(t) dt + r_1 e'(t)$	$r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s$	$r_0 \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$

V tab. 2 jsou pro jednoduchost používány místo konstant  $r_0$ ,  $r_{-1}$  a  $r_1$  časové konstanty  $T_i$  a  $T_d$  kde:

$$T_i = \frac{r_0}{r_{-1}} \quad (26)$$

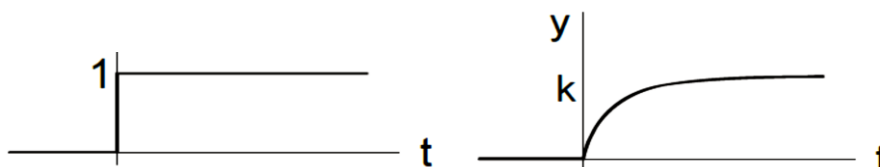
$$T_d = \frac{r_1}{r_0} \quad (27)$$

Další typy regulačních kombinací jsou popsány podrobněji v [8]. Vzhledem k malé složitosti regulace teploty na výkonové části zařízení pro radiový přenos není nutno se jim podrobněji věnovat.

### 3.2.2 Regulační soustava 1. řádu

Regulační soustavu 1. řádu lze definovat jako regulátor s časovým zpožděním, nikoliv však s dopravním zpožděním. Tento regulační člen má výstupní odezvu s určitým zpožděním oproti vstupnímu signálu. Charakteristikami tohoto členu je zesilovací činitel  $k$  a konstanta časového zpoždění  $\tau$ .

Soustavu si lze jednoduše představit jako přechodný jev při nabíjení kondenzátoru ve stejnosměrném obvodu. Výstupní odezvu na skokovou vstupní funkci je tedy exponenciální funkce (obr. 11).



Obr. 11: Vstupní a výstupní odezva soustavy 1. řádu, převzato z [9]

---

Soustavu 1. řádu lze popsat diferenciální rovnicí

$$a_1 \cdot y'(t) + a_0 \cdot y(t) = b_0 \cdot u(t) \quad (28)$$

kterou dále upravíme na tvar

$$\tau \cdot y'(t) + y(t) = k \cdot u(t) \quad (29)$$

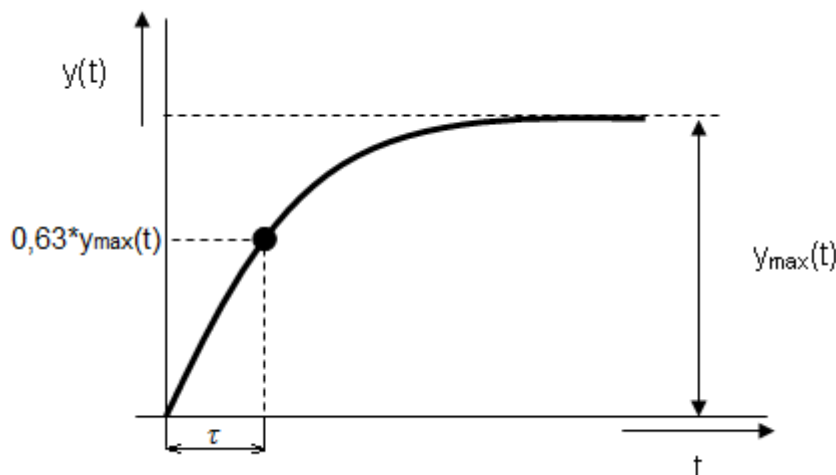
kde  $\tau = a_1/a_0$  je časová konstanta soustavy a  $k = b_0/a_0$  je zesílení soustavy. Pak z rovnice (29) získáme operátorový přenos pro tuto soustavu

$$F(s) = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (30)$$

a dále přechodovou funkci

$$h(t) = k \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (31)$$

Časová konstanta  $\tau$  pak odpovídá času, za který soustava dosáhne 63% ustálené hodnoty.



Obr. 12: Přechodová charakteristika regulátoru 1. řádu

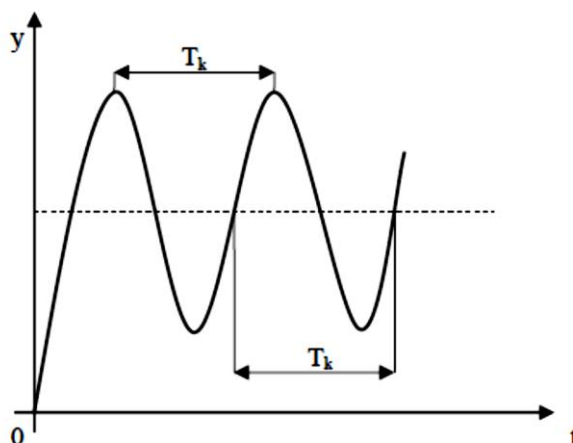
### 3.2.3 Metody nastavení parametrů regulátorů

Hlavním cílem při návrhu regulátoru je dosažení nejlepší kvality regulace a také výborné stability systému. Metody nastavování lze dělit na:

- Integrální kritéria
  - tato kritéria vychází z minima regulační plochy (IE, IAE, ISE, ITAE)
- Globální metody seřizování
  - metody relativního tlumení, metoda optimálního modulu
- Experimentální metody seřizování
  - Ziegler-Nicholsovy metody – tato metoda bude dále popsána

### 3.2.3.1 Ziegler-Nicholsova metoda kritického zesílení

„Metoda byla původně empirická a sloužila k nastavení parametrů regulátoru ve skutečném zapojení. Později byl odvozen i matematický postup. Principem metody je přivést obvod do kritického stavu tj. na hranici stability, přičemž jsou vyřazeny integrační a derivační složka  $T_i \rightarrow \infty$ ,  $T_d \rightarrow \infty$  resp.  $r_{-1} \rightarrow 0$ ,  $r_1 \rightarrow 0$ . Na hranici stability obvod přivedeme postupným zvyšováním zesílení  $r_0$ , až začne obvod kmitat netlumenými kmity. Zesílení na hranici stability se nazývá kritické zesílení  $r_{0k}$  a perioda netlumených kmitů kritická perioda  $T_k$ , kterou určíme podle obr. 13“[8]



Obr. 13: Určení kritické periody kmitu, převzato z [8]

Parametry k nastavení určitých regulátorů lze určit dle následující tabulky. Je ale nutno znát parametry  $r_{0k}$  a  $T_k$ .

Typ regulátoru	$r_0$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 r_{0k}$	-	-
PI	$0,45 r_{0k}$	$0,83 T_k$	-
PD	$0,4 r_{0k}$	-	$0,05 T_k$
PID	$0,6 r_{0k0}$	$0,5 T_k$	$0,12 T_k$

Tab. 3: Parametry regulátorů dle Ziegler-Nicholse[8]



---

# 4 Výpočtový model

## 4.1 Sestavení matematického modelu

Pro sestavení modelu v programu Matlab Simulink potřebujeme určit diferenciální a bilanční rovnice tepla pro požadované teploty, podle kterých lze sestavit model a následně simulovat celé zařízení.

Pro topnou patronu platí následující bilanční rovnice:

$$m_P \cdot c_P \cdot \dot{T}_P = P_P - Q_V \quad (32)$$

Dále rovnice pro určení hodnoty tepelného toku způsobeným vedením  $Q_V$ :

$$Q_V = \frac{2\pi \cdot \lambda_{CH} \cdot L \cdot (T_P - T_{CH})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (33)$$

Po dosazení z (33) do (32) lze určit diferenciální rovnici pro výpočet teploty topné patrony  $T_P$  v závislosti na čase  $t$ :

$$\dot{T}_P = \frac{P_P - \left( \frac{2\pi \cdot \lambda_{CH} \cdot (T_P - T_{CH})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \right)}{m_P \cdot c_P} \quad (34)$$

Jako podobně výše uvedený vztah (32) lze odvodit bilanční rovnici pro chladič:

$$m_{CH} \cdot c_{CH} \cdot \dot{T}_{CH} = Q_V - Q_K \quad (35)$$

Za další tepelný tok zařízením lze považovat tepelný tok tvořený konvencí  $Q_K$ :

$$Q_K = \alpha_{CH} \cdot S_{CH} \cdot N_f \cdot (T_{CH} - T_0) \quad (36)$$

Pokud nápodobně dosadíme vztah (36) do (35), dostaneme vztah pro teplotu chladiče  $T_{CH}$  v závislosti na čase, tudíž diferenciální rovnici:

$$\dot{T}_{CH} = \frac{\frac{2\pi \cdot \lambda_{CH} \cdot (T_P - T_{CH})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} - \alpha_{CH} \cdot S_{CH} \cdot N_f \cdot (T_{CH} - T_0)}{m_{CH} \cdot c_{CH}} \quad (37)$$

Pokud bychom chtěli určit výstupní teplotu vzduchu proudící přes chladič přirozenou, či nucenou konvencí, lze odvodit také bilanci teplot, v níž se vyskytuje odpor toku chladiva  $R_Q$  a tepelný odpor při konvekci  $R_\alpha$ :

$$\frac{1}{R_\alpha} \cdot (T_{CH} - T_{OUT}) + \frac{1}{R_Q} \cdot (T_0 - T_{OUT}) = 0 \quad (38)$$

po vyjádření  $T_{OUT}$  dostáváme:

$$T_{OUT} = \frac{T_{CH}}{\left(1 + \frac{R_{\alpha}}{R_Q}\right)} + \frac{T_0}{\left(1 + \frac{R_Q}{R_{\alpha}}\right)} \quad (39)$$

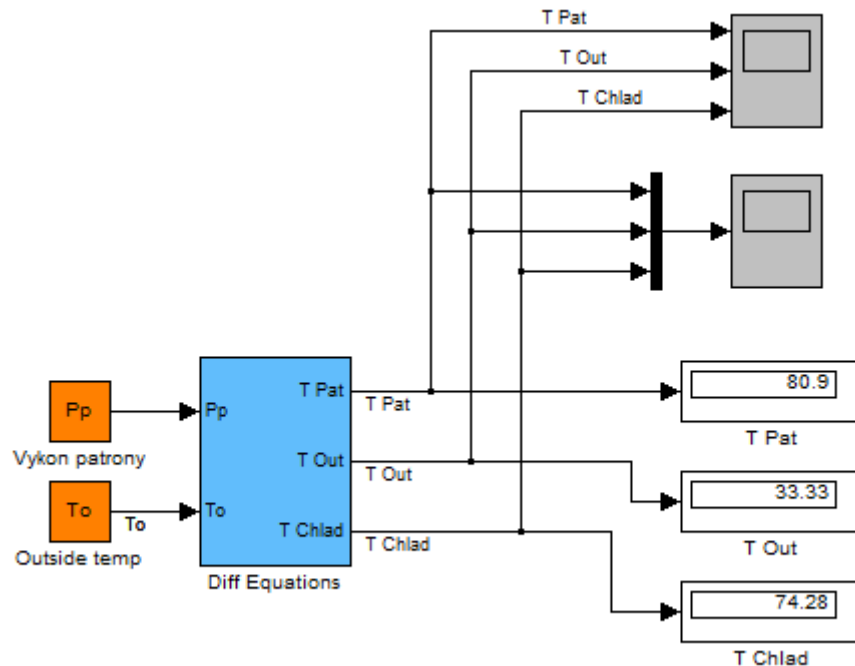
kde  $R_{\alpha}$  je modifikovaný vztah pro výpočet tepelného odporu při konvekci (21), přičemž za  $\alpha$  se dosadí vztah pro odpor toku chladiva:

$$R_{\alpha} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{CH}} \quad (40)$$

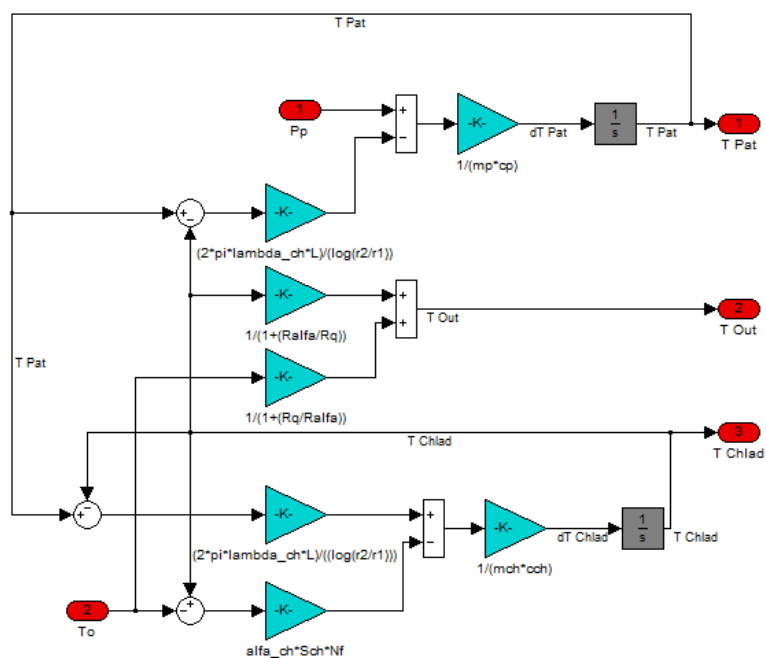
## 4.2 Model v programu Matlab Simulink

V kapitole 4.1 jsou uvedeny všechny potřebné vztahy pro možnost vytvoření modelu v programu Matlab a jeho nastavy Simulink. Jde především o vytvoření diferenciálních rovnic soustavy a jejich následném modelování v tomto programu.

Výstupem diferenciálních rovnic jsou přímo teploty topné patrony  $T_P$ , teplota výstupního vzduchu  $T_{OUT}$  a teplota na žebrech chladiče  $T_{CH}$ . Jako vstup soustavy byla uvažována samozřejmě i teplota okolí  $T_0$  a také tepelný výkon topné patrony  $P_p$  ve wattech. Pro sestavení modelu a jsou zapotřebí také různé parametry jednotlivých konstant, kapacit materiálů atd. Všechny potřebné parametry soustavy jsou určeny či vypočítány dle rozměrů reálného modelu, dle materiálů, ze kterých je reálný model tvořen a také podle jiných vlastností. Správné parametry potřebné k simulaci jsou uvedeny v příloze *parametry\_elektronka.m*.



Obr. 14: Model soustavy v programu Matlab/Simulink



Obr. 14: Subsystém modelu soustavy v programu Matlab/Simulink

### 4.3 Model v prostředí SimScape

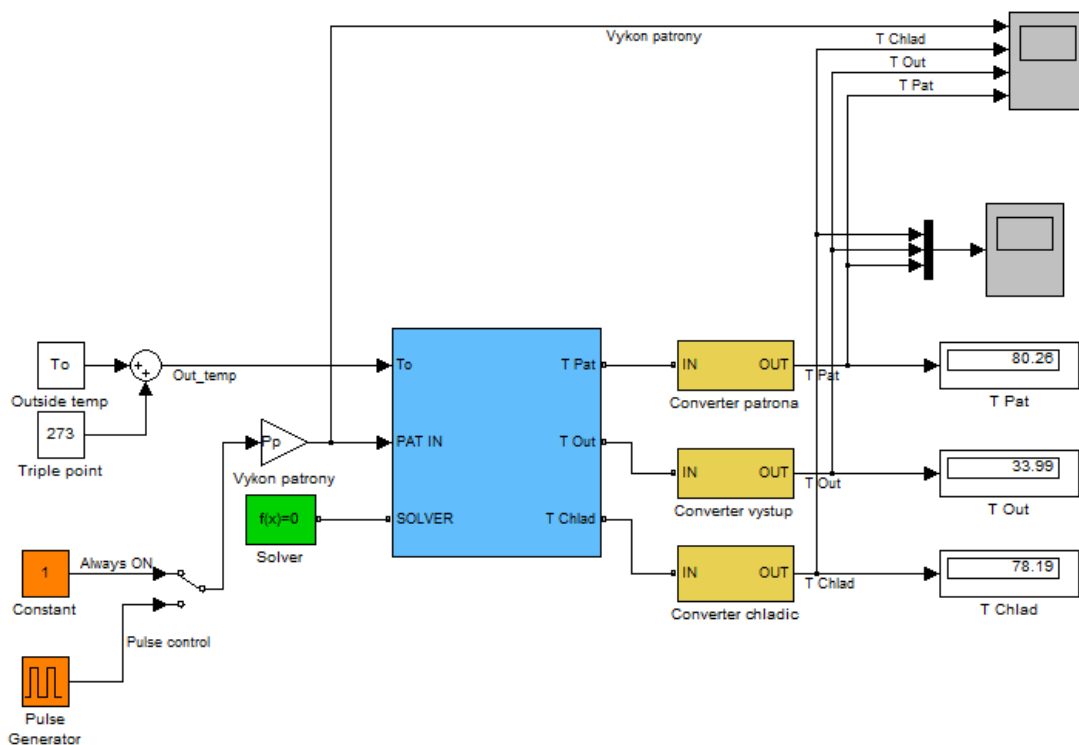
Pro jednoduchost bude model řešen pomocí programu Matlab a jeho nadstavbové části Simulink, která obsahuje knihovnu Simscape zaměřenou přímo na fyzikální obvody, a to konkrétně: tepelné, elektrické, hydraulické, pneumatické a mechanické. V případě našeho modelu použijeme knihovnu tepelnou. Při těchto výpočtech odpadají problémy s řešením rovnic, protože jednotlivé rovnice jsou implementovány v určitých prvcích obvodu a nemusíme je řešit.

Model v prostředí Matlab/Simulink/SimScape je totožný s modelem vytvořený v prostředí Simulink a tudíž vypočtené hodnoty teplot po simulaci by měli být stejné. Stejná teplota výstupního vzduchu  $T_{out}$  ale není proto, že v modelu v programu Matlab/Simulink je zavedena konstanta  $N_f$ , která udává hodnotu účinnosti žebíř chladiče při předávání tepla do okolí. V tomto modelu je nutno brát v úvaze také tepelné kapacity materiálů popřípadě ostatní konstanty. Za hlavní tepelné kapacity systému se považují:

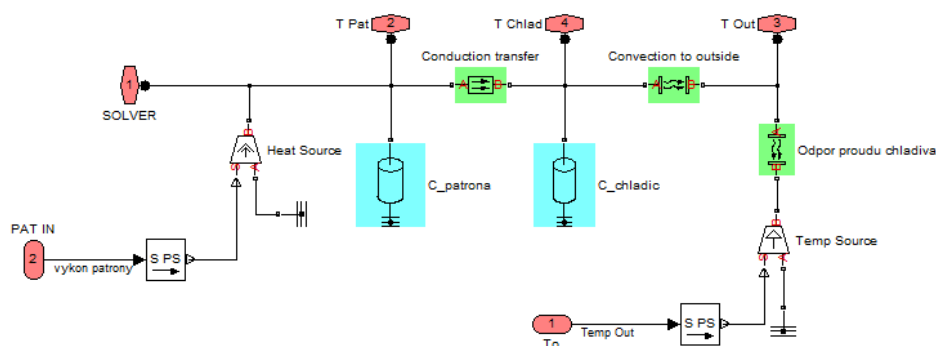
- $C_P$  [W.s.K<sup>-1</sup>] (C\_patrona)
- $C_{CH}$  [W.s.K<sup>-1</sup>] (C\_chladic)

kde  $C_P$  je tepelná kapacita topné patrony, která je vyrobena z železa a  $C_{CH}$  je tepelná kapacita chladiče, která je pro změnu z mědi. A jak je známo měď má velmi nízkou tepelnou kapacitu (383 J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> při okolní teplotě 25°C), ale také velkou tepelnou vodivost  $\lambda_{CH}$  (386 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>). Z tohoto důvodu velké tepelné vodivosti je také minimalizována časová konstanta  $\tau$  teploty na vnějším povrchu chladiče.

Dalšími hlavními konstantami k potřebnému výpočtu jsou hmotnosti a plochy jednotlivých součástí zařízení. Plocha  $S_{CH}$  chladiče byla změřena a vypočítána dle základních matematických vztahů a hmotnost chladiče  $m_{CH}$  a topné patrony  $m_P$  byly odečteny z přesné digitální váhy.



Obr. 16: Schéma modelu soustavy v Matlab/Simulink/SimScape



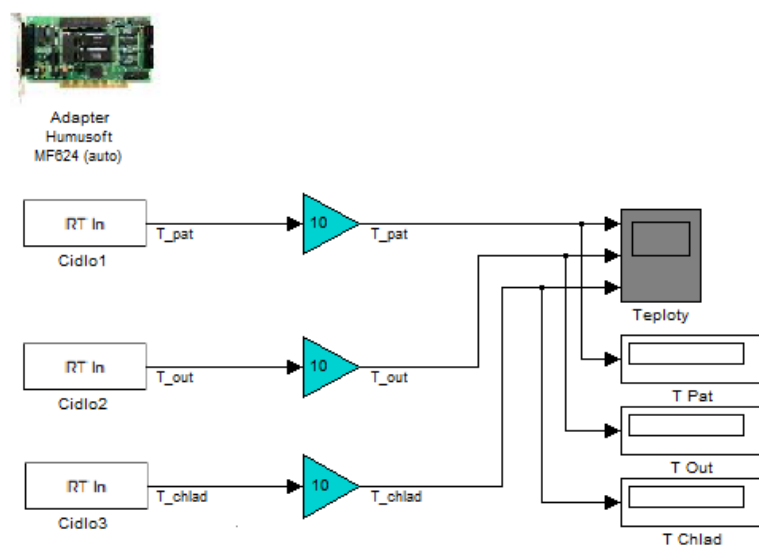
Obr. 17: Subsystém modelu v Matlab/Simulink/Simscape

Na obr.17 lze vidět subsystém (tepelnou síť) celé soustavy v kterém vystupuje hned několik parametrů. Modře zvýrazněné bloky jsou tepelné kapacity patrony  $C_P$  a chladiče  $C_{CH}$ . Kapacity jsou nejvíce ovlivněny materiálem a hmotností těchto částí. Mezi topnou patronou a chladičem dochází ke kondukcí neboli k vedení tepla, proto musíme mezi tyto dvě části zavést blok *Conduction transfer*. Další “zelený” blok *Convection to outside* popisuje tepelný proces konvekce, v kterém figuruje jako hlavní parametr plocha chladiče  $S_{CH}$ . Dalším blokem je *Odpor proudu chladiva*, který reaguje na změnu proudění vzduchu  $Q$  (změřeno a vypočteno v kapitole 5.1) a tím pádem dochází i ke změně součinitele přestupu tepla  $\alpha_{CH}$ . Z jednotlivých uzlů tepelné sítě lze poté snímat konkrétní teploty.

---

## 5 Měření a zpracování dat

Měření a zpracování dat na zařízení jako takovém bylo provedeno po celkovém sestavení ventilátoru, topné patrony, chladiče, KGR trubky (podrobněji popsáno v kapitole 6.3) a následně změřeno na reálném zařízení tepelné komory. Z tepelné komory jsou přenášeny hodnoty všech teplot do PC a do programu Matlab přes kartu Humusoft MF-624, která nám umožňuje měření v reálném čase. Model pro měření teplot je na obr. 18. Všechny potřebné hodnoty byly v modelu převedeny do workspace Matlabu přes prvek scope. Tyto hodnoty se poté dále vyfiltrovaly a zpracovali.



Obr. 18: Model pro měření teplot v programu Matlab

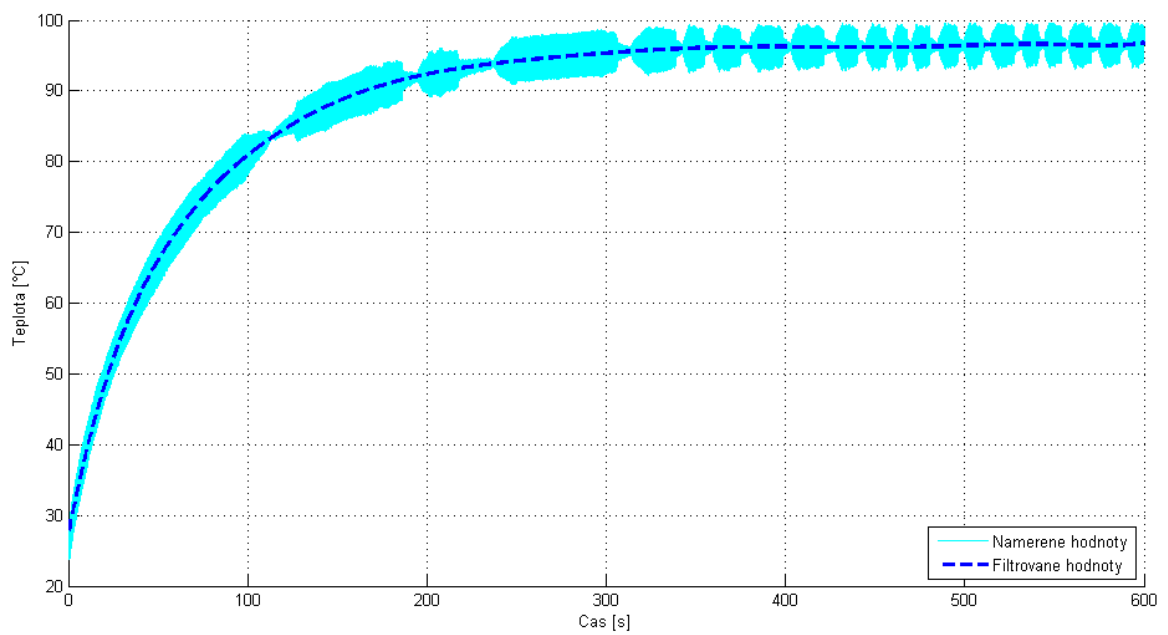
Dále bylo potřeba nastavit správně regulátor otáček ventilátoru tak, aby nedocházelo k přehřívání topné patrony a aby se teplo dobře odvádělo v závislosti na rychlosti proudění vzduchu. Po několika měření se ale ukázalo, že pro ventilátor typu (*Atas Mezaxial 3142*) musel mít kvůli nízkému průtoku vzduchu maximální otáčky, tudíž maximální průtok. Měření průtoku vzduchu se budeme věnovat v kapitole 5.1.

### 5.1 Měření v reálném čase

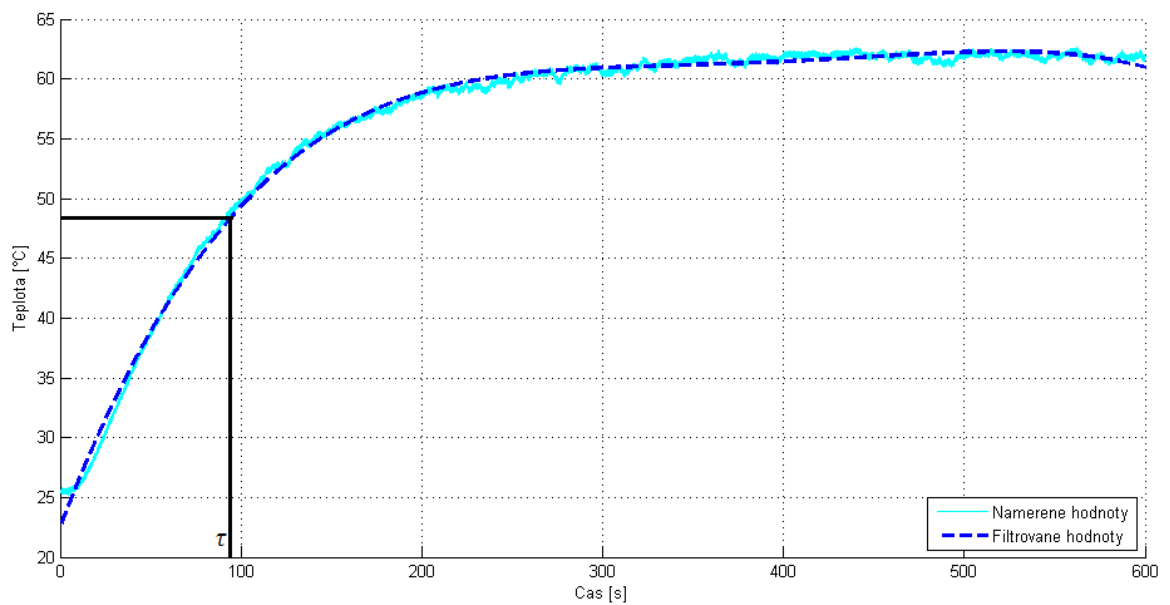
Měření bylo prováděno po dobu 600s, za kterou se všechny teploty ustálily. Jak už vyplývá z kapitoly 4, kde byly simulovány tyto tři teploty:

- $T_P$  – teplota na topné patroně
- $T_{CH}$  – teplota na vnějším povrchu chladiče
- $T_{OUT}$  – teplota výstupního vzduchu,

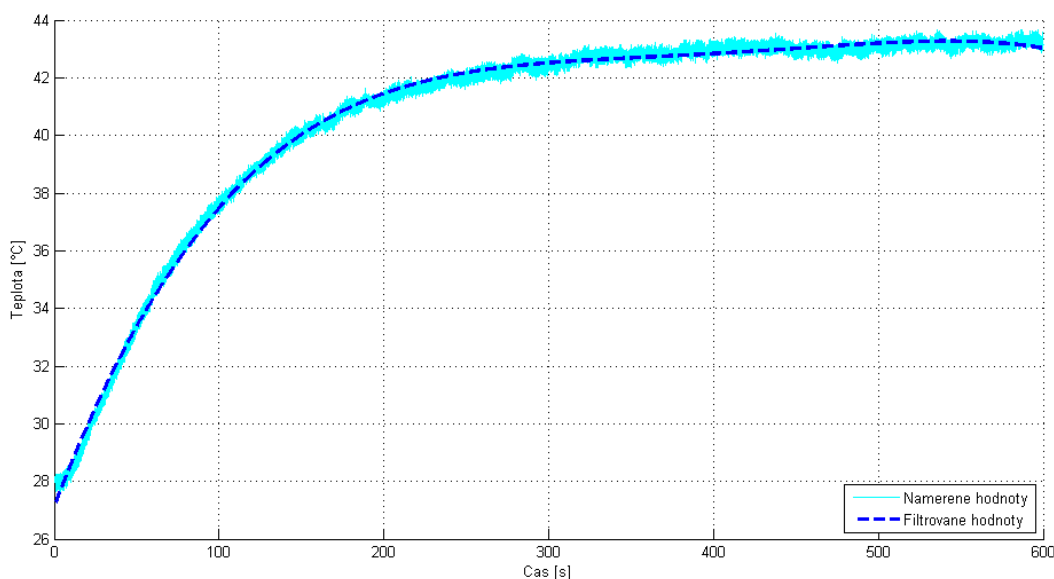
byly také i reálně změřeny. Po ukončeném měření si určíme časovou konstantu systému  $\tau$ , a to konkrétně pro teplotu na vnějším povrchu chladiče. Časová konstanta  $\tau$  je čas, za který dosáhne teplota chladiče 63% své ustálené hodnoty.



Obr. 19: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot topné patrony



Obr. 20: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot povrchu chladiče



Obr. 21: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot výstupního vzduchu

Dle grafů jde vidět, kde se námi měřené hodnoty ustálily a za jaký čas, přesněji:

- $T_P$  – 96,5 °C za 500s
- $T_{CH}$  – 62,2 °C za 510s
- $T_{OUT}$  – 43,3 °C za 530s

Jak lze dále vidět, tak v naměřených hodnotách se vytváří šum, který je tvořen patrně z rušení okolními vlivy. Tento šum se v programu Matlab proloží polynomem x-tého řádu, který hodnoty vyfiltruje.

Z výše uvedené ustálené hodnoty  $T_{CH}$  a okolní teploty  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  určíme časovou konstantu systému  $\tau$ :

$$[0,63 \cdot (62,2^\circ\text{C} - T_0)] + T_0 = 48,4^\circ\text{C} \rightarrow \underline{\tau = 93\text{s}}$$

Další bod měření spočíval v určení přesné hodnoty průtoku vzduchu za sekundu. Výrobce ventilátoru udává maximální průtok  $Q = 0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ . Při tomto průtoku lze vypočítat dle vztahu (25) odpor toku chladiva při teplotě  $40^\circ\text{C}$   $R_Q = 0,0156 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , kde  $\rho_{40} = 1,127 \text{ kg}/\text{m}^3$  a  $C = 1136 \text{ W}\cdot\text{s}/\text{Kg}\cdot\text{K}$ . Odpor toku chladiva ovlivňuje především teplotu na vnějším povrchu chladiče a teplotu výstupního vzduchu, proto je nutné tento odpor co nejpřesněji určit.

Měření skutečné hodnoty průtoku vzduchu bylo prováděno na speciálním přípravku určeném k tomuto měření. Zde se naměřila skutečná hodnota průtoku vzduchu zařízením  $Q$ , která vychází ze vztahu:

$$Q = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{C_d \cdot \rho}} = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 5,4}{1,13 \cdot 1,2759}} = 0,0215 \text{ m}^3/\text{s} \quad (41)$$

kde  $\Delta p$  je přetlak tvořený ventilátorem oproti tlaku atmosférickému,  $S$  je plocha průřezu přípravku,  $C_d$  je ztrátový součinitel a  $\rho$  je hustota vzduchu.

## 5.2 Zhodnocení měření

Toto měření bylo celkem úspěšné, ale poněkud odlišné od očekávaných hodnot. Hlavním problémem ideálního modelu byla geometrie celého zařízení, žeběr, měděných pouzder apod. Větším přiblížením reálných hodnot k ideálním hodnotám by se dalo více způsoby:

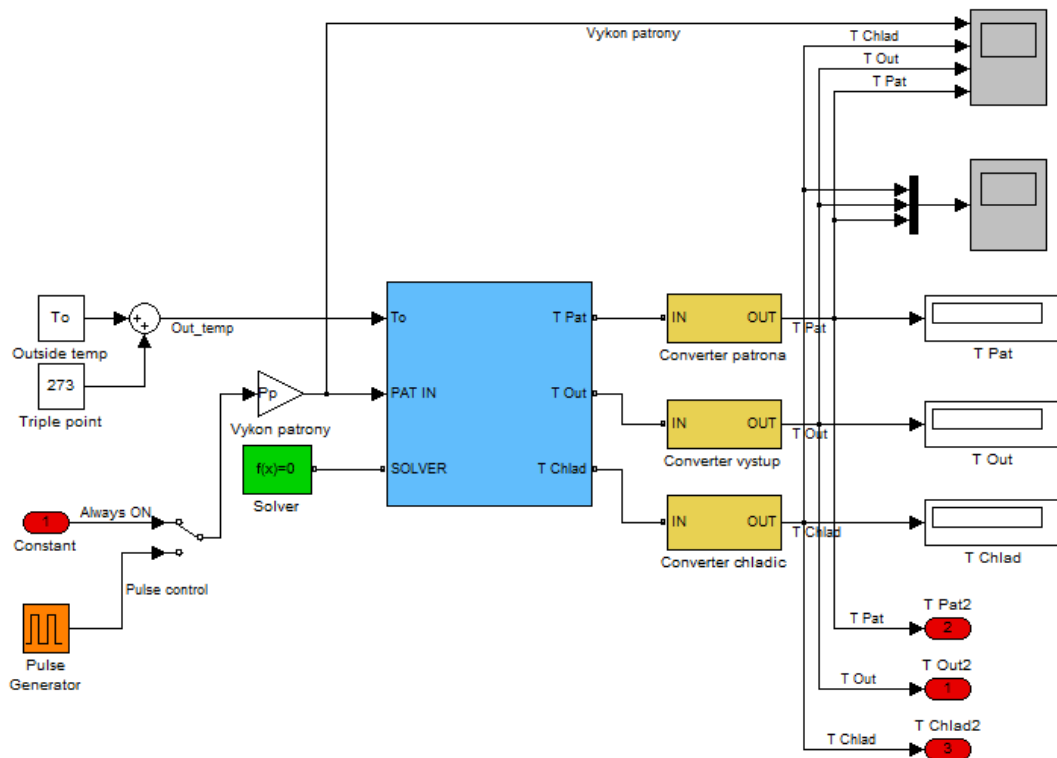
- přesnějším určením tepelných kapacit, tepelných vodivostí a ostatních parametrů
- odstraněním nepřesností termoelektrických článků a rušení karty Humusoft MF-624
- zvětšením průtoku vzduchu zařízením (ventilátor s větším průtokem)

Z těchto způsobů "vylepšení" reálného modelu lze soudit, že hodnoty ideálního a reálného experimentu se daly očekávat mírně odlišné.

## 5.3 Verifikace výpočtového modelu

Pokud bychom porovnali výstupní ustálené teploty jak u modelu simulačního z kapitoly 4, tak modelu reálného, došli bychom k závěru mírně odlišných teplot. To je především způsobeno nepřesnými parametry simulovaného modelu. Pro tyto případy existuje v programu Matlab/Simulink toolbox Parameter Estimation, který vhodně odhadne parametry ideálního modelu (v určených mezích minima a maxima) podle dat z modelu reálného.

Nejprve je nutno si upravit výpočtový model tak, že si nahradíme vstupy a výstupy soustavy bloky *IN* a *OUT*. V našem případě budou výstupy tři pro jednotlivé teploty a vstupem bude konstanta pro trvalý výkon topné patrony.



Obr. 22: Upravený model pro určení parametrů pomocí Parameter Estimation



Takto upravený model je připraven pro návrh parametrů. Toolbox lze najít v horní záložce *Tools* v Matlab/Simulink a po zvolení volby *Parameter Estimation...*

Postup pro určení odhadovaných parametrů soustavy je následující:

- V menu *Transient data* zvolíme *New*, vytvoří se záložka *New Data*,
- v této záložce importujeme *Input Data* a *Output Data*. Jako vstup soustavy je konstanta 1 a jako výstupy jsou námi změřené hodnoty z reálného zařízení, které byly do *workspace* Matlabu převedeny přes blok *Scope*.
- V menu *Variables* přidáme všechny parametry systému, které chceme estimovat (navrhovat),
- poté v menu *Estimation* vytvoříme novou estimaci a vytvoří se záložka *New Estimation* a v další záložce zatrhneme naše požadované data. Předposledním krokem je záložka *Parameters*, ve které lze zvolit volbu navrhovaných parametrů, popřípadě nastavení minimálních a maximálních hodnot.
- V posledním kroku zbývá záložka *Estimation* a tlačítko *Start*.

Parametry, které byly navrženy pomocí *Parameter Estimation* jsou zatrženy ve sloupci *Estimate* (obr. 22). Z důvodu vysoké časové náročnosti výpočtu nebylo možné provést těchto odhadů mnoho.

Estimation parameters						
Name	Value	Estimate	Initial Guess	Minimum	Maximum	Typical Va...
C	1136	<input type="checkbox"/>	1136	-Inf	+Inf	C
Pp	304.13	<input checked="" type="checkbox"/>	250	100	500	Pp
Q	0.023774	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0215	0.005	0.05	Q
Sch	0.39999	<input checked="" type="checkbox"/>	0.2033	0.1	0.4	Sch
To	30	<input checked="" type="checkbox"/>	28	25	30	To
alfa_ch	27.526	<input type="checkbox"/>	27.526	20	30	alfa_ch
cch	380	<input type="checkbox"/>	380	200	1000	cch
cp	450	<input type="checkbox"/>	450	-Inf	+Inf	cp
init_temp	301	<input type="checkbox"/>	298	-Inf	+Inf	init_temp
lambda_ch	11	<input checked="" type="checkbox"/>	120.5	11	134	lambda_ch
mch	1.5	<input type="checkbox"/>	1.5	1	2	mch
mp	0.08	<input type="checkbox"/>	0.08	-Inf	+Inf	mp
ro	1.127	<input type="checkbox"/>	1.127	-Inf	+Inf	ro

Obr. 23: Tabulka nejvhodnějších hodnot parametrů ideálního modelu

kde  $P_p$  je navrhovaný výkon topné patrony,  $S_{CH}$  je plocha žebër chladiče a  $\lambda_{CH}$  je tepelná vodivost materiálu, z kterého je chladič konstruován. S těmito parametry se ideální model co nejlíc blíží reálnému a jsou vhodné pro další simulování.

---

## 6 Návrh zařízení

Při hlavním návrhu zařízení pro radiový přenos požadujeme:

- ustálenou teplotu výstupního vzduchu,
- ustálenou teplotu na chladiči výkonové části,
- regulaci ventilátoru a tím i průtok vzduchu přes chladič,
- nepřehřátí výkonové části (elektronky) zařízení pro radiový přenos

### 6.1 Regulace teploty

Jako první navrhovanou možnost regulace teploty bychom určitě navrhovali regulovat průtok chladiva určitým typem regulátoru. V našem případě konkrétně bereme jako chladivo vzduch. Návrh je řízení PI regulátorem, jak vyplývá z naměřených a zpracovaných teplot, ale také ze složitosti soustavy. Z důvodu nepříliš vysoké náročnosti soustavy lze volit jiný způsob teplotní regulace.

Po prozkoumání voleb jednotlivých regulátorů na internetu můžeme najít na webu obchodu GES ([www.ges.cz](http://www.ges.cz)) konkrétní stavebnici pod označením G705. Jde o stavebnici regulátoru otáček univerzálního motoru 230V/AC o maximálním příkonu 450W. Jedná se o klasickou triakovou regulaci. Tuto stavebnici použijeme pro námi zmíněnou regulaci ventilátoru, který bude vytvářet průtok vzduchu přes chladič. V kapitole 6.2 je schéma podrobněji popsáno.

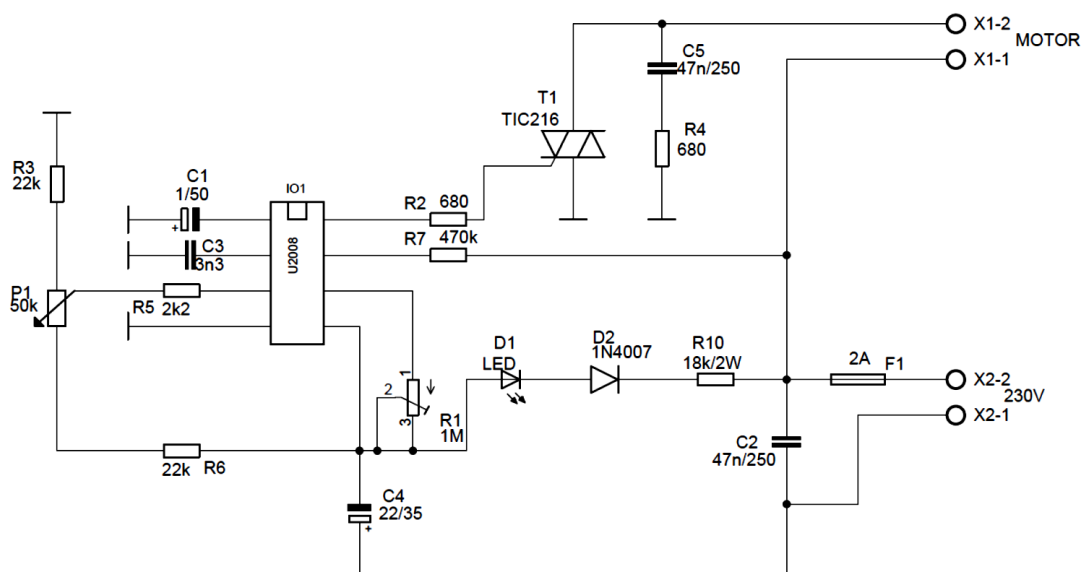
V případě stavebnice z [www.ges.cz](http://www.ges.cz) jde ale o regulaci pouze manuální, pomocí potenciometru. Ten nám zajišťuje regulaci otáček ventilátoru a tím pádem i regulaci průtoku vzduchu dle naší volby. Proto je nutné toto zapojení automatizovat a použít tzv. aktivní člen pro snižování popřípadě zvyšování průtoku vzduchu soustavou. Aktivním členem byl zvolen NTC (Negative Temperature Coefficient resistor) termistor s označením B57164K0473K000 ([www.gme.cz](http://www.gme.cz)), který snižuje odpor v závislosti na snímané teplotě vzduchu. Více parametrů více uvedeného termistoru lze najít v datasheetu (viz. příloha). Originální schéma bylo následně předěláno a doplněno o aktivní člen (obr. 24).

### 6.2 Schéma zapojení

#### 6.2.1 Originální zapojení

Schéma zapojení je převzato z výše uvedené stavebnice G705.

*„Regulační obvod je vložen do síťového přívodu k motoru. Jádrem celého zapojení je integrovaný obvod U2008B (IO1), který obsahuje všechny potřebné funkční bloky (napěťový, proudový a limitační detektor; pomalý start; fázová regulační jednotka; reference). Obvod je synchronizován se sítí přes omezovací rezistor R7 (470kΩ/R0207)) na vstup VSYNC (vývod 7 IO1). Napájení obvodu je galvanicky spojeno se sítí, úbytek napětí zajišťuje vlastní reaktancí foliový kondenzátor C2 (47nF/CFAC) v provedení na 250V.“ [11]*

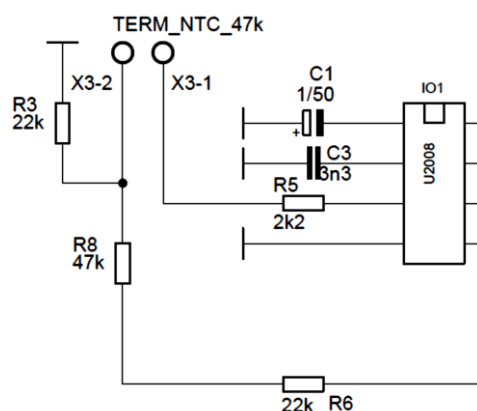


Obr. 24: Schéma zapojení stavebnice G705

„Otáčky motoru se nastavují potenciometrem P1 (50k $\Omega$ ). Z jeho běžce je přivedeno řídicí napětí na vstup CTR (vývod 3) obvodu IO1 (U2008B). Triak T1 (TIC216) je fázově řízen z výstupu OUT (vývod 8 IO1). Maximální příkon motoru je omezen na 450W.“ [11]

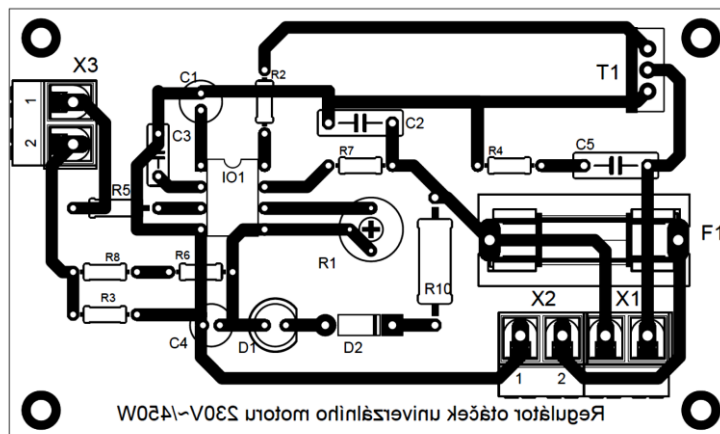
## 6.2.2 Upravené zapojení

Při návrhu automatické regulace pro ventilátor jsme vycházeli z úvahy, při které se regulují otáčky pomocí potenciometru. Takto lze místo potenciometru 50k $\Omega$  vhodně zapojit výše známý termistor NTC 47k $\Omega$ . Hodnota odporu termistoru byla zvolena podle hodnoty potenciometru v originálním zapojení. Pokud si představíme náhradní schéma potenciometru a jeho funkčnost, tak místo pevné hodnoty odporu mezi krajními vývody lze nahradit za rezistor 47k $\Omega$  a mezi krajním a prostředním vývodem lze takto nahradit proměnný odpor termistorem. Nastavení minimální hodnoty zásahu regulátoru se dosáhne doladěním trimru R1.

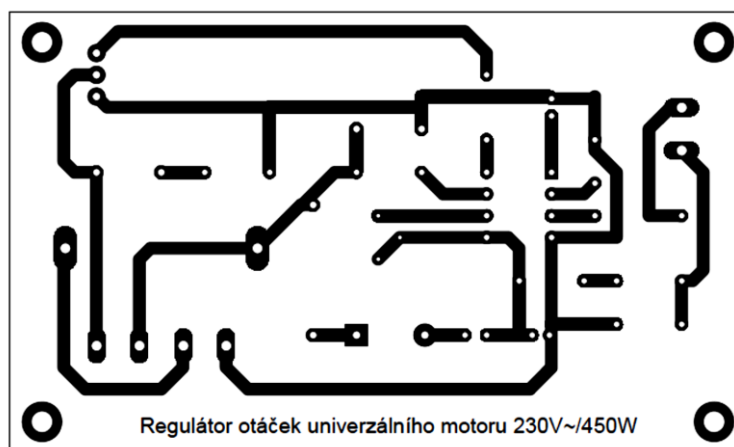


Obr. 25: Upravený koncový člen schématu regulátoru s termistorem NTC

Regulátor otáček ventilátoru je vyroben na jednostranné desce s plošnými spoji o rozměrech 85 x 50mm. Při pečlivé práci by měl regulátor fungovat hned při prvním pokusu. Na samotný výkonový prvek T1 (TIC216) je vhodné umístit malý chladič z důvodu zahřívání.



Obr. 26: Pohled ze strany součástek desky plošného spoje



Obr. 27: Pohled ze strany desky plošného spoje

### 6.3 Konstrukce

Jako reálnou konstrukci pro měření a experimenty je nutno vytvořit kanál pro proudění vzduchu. Jako kanál lze použít redukci pro odpadní trubky KGR 110/160mm, popřípadě jiný typ trubky. Tento rozměr je volen tak, aby odpovídal co nejpřesněji rozměrům elektroniky a ventilátoru.



Obr. 28: vlevo redukce KGR 110/160mm, vpravo Atas Mezaxial 3142

---

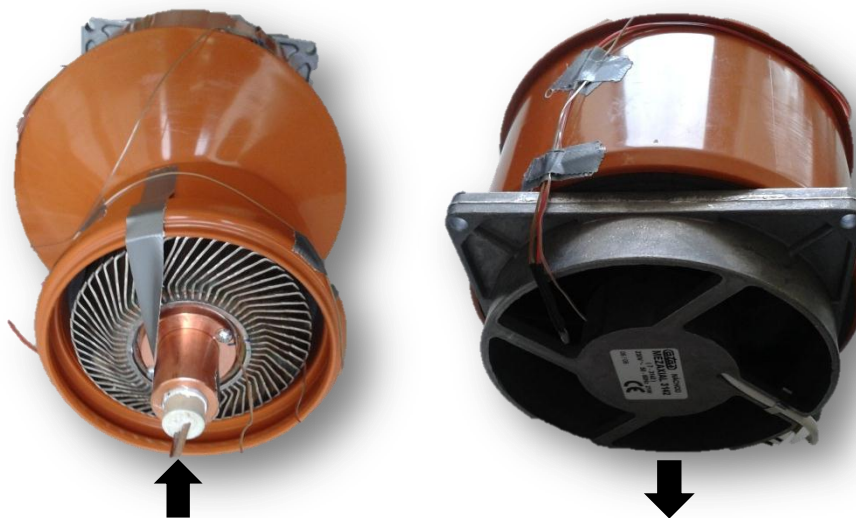
Pro aktivní proudění vzduchu systémem byl zvolen axiální ventilátor ATAS Mezaxial 3142, průměry a ostatní katalogové hodnoty jsou uvedeny v datasheetu (viz. příloha).

Hlavní částí systému je námi zmiňovaná výkonová část pro radiový přenos. Jedná se o výkonovou vysílací elektroniku *GU-43B*. Parametry této vysílací elektronky viz. [14]. Pro simulaci tepelné části elektronky jsme zvolili topnou patronu od výrobce *Acim Jouanin* o menším výkonu, přesně 250W (určeno z modelu soustavy) s označením *H16X80X250*, kterou jsme umístili místo anody elektronky (Obr. 28).



*Obr. 29: Topná patrona jako náhrada za tepelnou část elektronky*

Při sestavení všech součástí soustavy uvedených výše dostáváme úplnou soustavu pro měření a experimenty (Obr. 29).



*Obr. 30: Reálný model výkonové části pro radiový přenos s vyznačeným směrem průtoku vzduchu*

Takto sestavené reálné zařízení osadíme třemi termočlánky na snímání různých teplot. Konkrétně měříme teplotu:

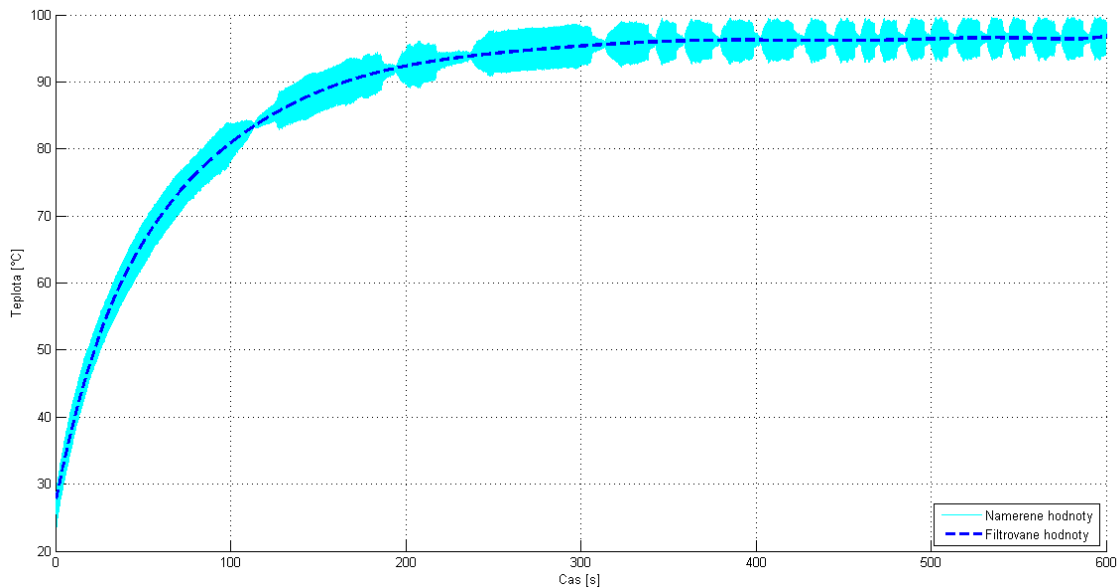
- výstupního vzduchu,
- na vnějším povrchu chladiče,
- na povrchu topné patrony.

## 6.4 Ověření funkčnosti

Funkčnost zařízení byla ověřována v mechatronické laboratoři na ústavu mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.

Nejprve bylo zkoušeno zapnutí topné patrony do sítě bez použití ventilátoru, ale docházelo k velkému přehřívání. Poté byl do funkce uveden i regulátor otáček ventilátoru, který zajišťuje průtok vzduchu přes chladič. Ve výše uvedeném upraveném regulátoru otáček s termistorem je nutno nastavit trimrem R1 minimální otáčky při pokojové teplotě. Z pozdějšího měření při automatickém zvyšování průtoku vzduchu vyplynulo, že měřená teplota na topné patroně překračovala maximální možnou teplotu 150°C. Proto je vhodné pro měření trimrem R1 zvýšit minimální otáčky ventilátoru až na maximum, tudíž ventilátor pracuje na nejvyšší možné otáčky a proudí ním maximální udávaný průtok vzduchu. Tímto způsobem se teplota na topné patroně ustálila na 96°C.

Měření bylo tedy provedeno při maximálním výkonu ventilátoru. Měřené teploty byly následně přenášeny do PC a do programu Matlab přes speciální experiment tepelné komory. Naměřená teplota uvnitř topné patrony a její filtrovaná hodnota je na Obr. 30.



Obr. 31: Průběh teplot topné patrony během měření při max. průtoku vzduchu

---

## 7 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vytvořit funkční tepelný model a regulátor otáček ventilátoru, který zajišťuje proudění dostatečného množství chladiva procházejícího přes chladič, čímž je zajištěno i dostatečné chlazení.

První část této práce pojednávala především o rešeršních studiích tepelných přenosů, různých tepelných odporů, ale také o několika typech regulátorů. Prostudování této kapitoly je nezbytně nutné k pochopení principu tepelných dějů na zařízení, ale také k porozumění v dalších kapitolách.

V další části jsou sestaveny jednotlivé rovnice popisující tepelné chování soustavy, které jsem později použil do výpočtového modelu v Matlab/Simulink. Pro ověření tohoto modelu jsem vytvořil model také v jiném prostředí, abych si ověřil správnost modelu prvního. Jak jde v této kapitole vidět, tak oba modely jsou svými výstupními hodnotami téměř shodné.

Předposlední kapitola se skládá z měření jednotlivých teplot na reálném zařízení a následně i porovnáním výpočtových modelů s reálnými hodnotami. Poté jsem upravil parametry ideálního modelu pomocí toolboxu Parameter Estimation v programu Matlab, který co nejvíce přiblížil parametry k reálnému chování zařízení.

Ve čtvrté a také poslední části je uveden popis sestavení reálného testovacího zařízení a jeho konstrukce. Po domluvě s vedoucím práce se výkonová část simulovala pomocí topné patrony, která nahrazovala výše zmiňovanou elektroniku. Jsou zde ještě uvedeny schémata návrhu triakového regulátoru pro ventilátor a návrh desky plošného spoje.

---

## 8 Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Termodynamická soustava + znaménkové konvence, převzato z [6]</i>	12
<i>Obr. 2: Základní typy sdílení tepla</i>	13
<i>Obr. 3: Průchod tepla jednoduchou rovinnou stěnou, převzato a upraveno z [4]</i>	14
<i>Obr. 4: Sdílení tepla prouděním. Sdílení tepla z tekutiny do stěny (vlevo), ze stěny do tekutiny (vpravo), převzato a upraveno z [4]</i>	14
<i>Obr. 5: Schéma záření z povrchu těles</i>	15
<i>Obr. 6: Teplo v toku chladiva, upraveno z [1]</i>	16
<i>Obr. 7: Jednorozměrné vedení tepla. Vlevo rovinná rozlehlá stěna, vpravo jednoduchá válcová stěna, upraveno z [1]</i>	18
<i>Obr. 8: Stěny, u nichž dochází k proudění chladiva. Vlevo rovinná rozlehlá stěna, vpravo jednoduchá válcová stěna, upraveno z [1]</i>	19
<i>Obr. 9: Část potrubí s tepelným tokem konvekcí přes stěnu, převzato z [1]</i>	20
<i>Obr. 10: Schéma regulátoru, převzato z [8]</i>	21
<i>Obr. 11: Vstupní a výstupní odezva soustavy 1. řádu, převzato z [9]</i>	22
<i>Obr. 12: Přejchodová charakteristika regulátoru 1. řádu</i>	23
<i>Obr. 13: Určení kritické periody kmitu, převzato z [8]</i>	24
<i>Obr. 14: Model soustavy v programu Matlab/Simulink</i>	26
<i>Obr. 15: Subsystém modelu soustavy v programu Matlab/Simulink</i>	27
<i>Obr. 16: Schéma modelu soustavy v Matlab/Simulink/SimScape</i>	28
<i>Obr. 17: Subsystém modelu v Matlab/Simulink/Simscape</i>	28
<i>Obr. 18: Model pro měření teplot v programu Matlab</i>	29
<i>Obr. 19: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot topné patrony</i>	30
<i>Obr. 20: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot povrchu chladiče</i>	30
<i>Obr. 21: Naměřené a vyfiltrované hodnoty teplot výstupního vzduchu</i>	31
<i>Obr. 22: Upravený model pro určení parametrů pomocí Parameter Estimation</i>	32
<i>Obr. 23: Tabulka nejvhodnějších hodnot parametrů ideálního modelu</i>	33
<i>Obr. 24: Schéma zapojení stavebnice G705</i>	35
<i>Obr. 25: Upravený koncový člen schématu regulátoru s termistorem NTC</i>	35
<i>Obr. 26: Pohled ze strany součástek desky plošného spoje</i>	36
<i>Obr. 27: Pohled ze strany desky plošného spoje</i>	36
<i>Obr. 28: vlevo redukce KGR 110/160mm, vpravo Atas Mezaxial 3142</i>	36
<i>Obr. 29: Topná patrona jako náhrada za tepelnou část elektronky</i>	37
<i>Obr. 30: Reálný model výkonové části pro radiový přenos s vyznačeným směrem průtoku vzduchu</i>	37
<i>Obr. 31: Průběh teplot topné patrony během měření při max. průtoku vzduchu</i>	38



---

## 9 Seznam použitých zdrojů

- [1] Vlach, Radek.: *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009, 94 s. ISBN 978-8-0214-3976-4.
- [2] Idelčik, I.E.: *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd Edition, New York, US, 2006, 816 s. ISBN 978-8-1799-2118-0.
- [3] Yunus, A.; Turner, H.; Cimbala, J.M.: *Fundamental of Thermal-fluid Sciences*. 3rd edition. McGraff Hill: Anstralia & New Zeland, 2008, 1152s. ISBN 978-0-0712-6631-4
- [4] Gymnázium, Brno, třída Kapitána Jaroše 14: *Přenos tepla*. [online]  
URL <<http://www.jaroska.cz/>>
- [5] Institute of Chemical and Environmental Engineering, Faculty of Chemical and Food Technology, Bratislava: *Přestup tepla*. [online]  
URL <<http://kchbi.chtf.stuba.sk/>>
- [6] ADAMOVSKEÝ, R.; NEUBERGER, P.: *Termomechanika I - termodynamika plynu, oběhy v plynech*. Technická fakulta CZU, Praha, 2000, 87s.
- [7] BLAHA, P.; VAVŘÍN. P.: *Řízení a regulace 1*. Skripta. VUT Brno, 2005, 214s.
- [8] OMELKA, V.: *Návrh regulátorů pro regulované soustavy s velkými časovými konstantami*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2011. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Olga Davidová, Ph.D..
- [9] Škola.Spectator, státnice automatizace: *Automatizace a technické prostředky IT*. [online]. URL <<http://skola.spectator.cz/>>
- [10] JINDŘICH, N.: *Aproximace soustavou prvního řádu*. UTB ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky: [online]. [rev. 2008-06-19], [cit. 2013-05-10]  
URL <<http://195.178.89.122/>>
- [11] SLÁNSKÝ, M.: *Regulace otáček motorů s obvodem U2008*: [online]. [rev. 2007-02-28], [cit. 2013-05-10]  
URL <<http://www.hw.cz/>>
- [12] *Thermistor NFC B57164K0473K000 – Datasheet*. [online]  
URL <<http://www.gme.cz/>>
- [13] *Ventilátor Mezaxial 3142 – Datasheet*. [online]  
URL <<http://www.atas.cz/>>
-

## 10 Seznam použitých zkratek a symbolů

$\alpha$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\alpha_k$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	střední součinitel přestupu tepla konvekcí
$\alpha_t$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla pro turbulentní proudění
$\alpha_{CH}$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla konvekcí (chladič–chladio)
$\varepsilon$	[-]	emisivita předmětu
$\lambda$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\lambda_{CH}$	[W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti chladiče
$\nu$	[m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	kinematická viskozita
$\rho$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota chladiva (vzduchu)
$\sigma$	[W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> ]	Stefanova-Boltzmannova konstanta
$\tau$	[s]	časová konstanta systému
$C$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
$c_{CH}$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita chladiče
$C_k$	[-]	součinitel tvaru (konvekce)
$c_P$	[J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita topné patrony
$d$	[m]	průměr (šířka) materiálu
$E$	[J]	teplo
$L$	[m]	délka materiálu
$m$	[kg]	hmotnost
$m_{CH}$	[kg]	hmotnost chladiče
$m_P$	[kg]	hmotnost topné patrony
$N_f$	[%]	účinnost žeber chladiče
$Nu$	[-]	Nusseltovo číslo
$P_P$	[W]	výkon topné patrony
$q$	[W]	tepelný tok
$q_k$	[W]	tepelný tok tvořený proudem chladiva
$q_P$	[W]	tepelný tok tvořený konvekcí (prouděním)
$q_Q$	[W]	teplo v toku chladiva
$q_s$	[W]	tepelný tok vyzařujícího předmětu
$q_v$	[W]	tepelný tok tvořený kondukcí (vedením)
$Q$	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	množství průtoku chladiva
$Q_V$	[W]	tepelný tok reálného modelu tvořený vedením
$Q_K$	[W]	tepelný tok reálného modelu tvořený konvekcí
$r$	[m]	poloměr předmětu
$R_\alpha$	[m·K·W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor stěnou při konvekcí
$R_\lambda$	[m·K·W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor stěnou při kondukcí
$R_Q$	[m·K·W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor proudu chladiva
$R_t$	[m·K·W <sup>-1</sup> ]	tepelný odpor

---

$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$S_{CH}$	[m <sup>2</sup> ]	plocha žeber chladiče
$t$	[°C]	teplota ve stupních Celsia
$t_0$	[°C]	počáteční teplota
$t_Q$	[°C]	teplota proudícího chladiva (tekutiny)
$\Delta t$	[°C]	rozdíl teplot
$T_0$	[°C]	počáteční teplota
$T_{CH}$	[°C]	teplota povrchu chladiče
$T_{OUT}$	[°C]	teplota výstupního proudícího vzduchu
$T_P$	[°C]	teplota topné patrony
$T$	[K]	teplota ve stupních Kelvina
$T_W$	[K]	teplota povrchu zářícího tělesa
$v$	[m·s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění

## 11 Seznam příloh

CD s následujícími soubory:

*parametry\_elektronka.m*

m-file programu Matlab, který zahrnuje všechny parametry modelů

*model\_elektronka\_simulink.mdl*

model v prostředí Matlab/Simulink

*model\_elektronka\_simscape.mdl*

model v prostředí Matlab/Simulink/SimScape

*regulace\_schema.sch*

schéma regulátoru stovebnice G705 v programu Eagle

*regulace\_schema\_termistor.sch*

schéma upraveného regulátoru stovebnice G705 s termistorem NFC v programu Eagle

*Datasheet - Thermistor NFC B57164K0473K000.pdf*

datasheet k termistoru NFC

*Datasheet - Mezaxial 3142.pdf*

datasheet k ventilátoru Mezaxial 3142