



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

NÁVRH TEPELNĚ IZOLOVANÉ KOMORY A ZAJIŠTĚNÍ JEJÍ REGULACE NA KONSTANTNÍ TEPLOTU

DESIGN THERMALLY INSULATED CHAMBER AND CONSTANT TEMPERATURE
REGULATION OF CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

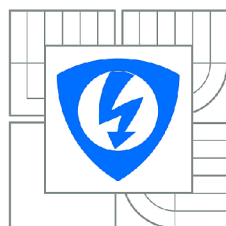
Pavel Vejnar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student: Pavel Vejnar
Ročník: 3

ID: 134657
Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Návrh tepelně izolované komory a zajištění její regulace na konstantní teplotu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Prozkoumejte teorii v oblasti přenosu tepla a způsobu chlazení měřicí komory.
2. Navrhněte koncepci teplotní komory, zjistěte rozložení teploty v komoře pomocí simulace v programu ANSYS. Následně vypočítejte její tepelný odpor. Porovnejte reálné měření a simulaci.
3. Poté instalujte Peltierovy články k regulaci teploty. Navrhněte diskretní regulátor pro regulaci na konstantní teplotu v rozsahu od 10°C do 60°C, regulujte pomocí programu v PC.
4. Navrhněte schéma zapojení elektronické regulace vytápění/chlazení testovací komory. Pro měření teploty využijte vhodně rozmístěná teplotní čidla a efektivní cirkulaci vzduchu pomocí ventilátoru. Navrhněte desky plošny

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] AKSENOV, A.I., GLUŠKOVA, D. N., IVANOV, V.I. Chlazení polovodičových součástek. SNTL Praha, 1975.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 27.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Soňa Šedivá, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce: Ing. Zdeněk Roubal

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem malé teplotní komory s regulací teploty. První část je věnována popisu Peltierových článků, teorii přenosu tepla a způsobu chlazení. Dále práce zkoumá výběr vhodného termoboxu a jeho tepelný odpor včetně simulací a reálného měření. V další části je komora simulována v programu ANSYS a porovnána s reálným měřením. Nakonec je vytvořena elektronická regulace teploty v komoře na konstantní hodnotu včetně naprogramování obslužného programu pro PC. Závěr shrnuje dosažené výsledky práce.

Klíčová slova:

Teplotní komora, Peltier, ANSYS, PSoC, CY8C27443-PXI, ADT7410, PT1000, teplotní odpor, měření teploty.

Abstract

The purpose of thesis is proposes a small temperature chamber with temperature control. The first part is focused on description Peltier cells, the theory of heat transfer and cooling. Next part of thesis is select suitable thermo-box and computes temperature resistance and includes simulation and real measuring. In next step is chamber simulate in program ANSYS and compare with real measuring. At the end is construct electronic control of temperature in thermo-box for constant value with programming program for the PC. The conclusion summarizes the results of the work.

Keywords

Temperature chamber, Peltier, ANSYS, PSoC, CY8C27443-PXI, ADR7410, PT1000, temperature resistance, measure of temperature.

Bibliografická citace díla:

VEJNAR, P. *Návrh tepelně izolované komory a zajištění její regulace na konstantní teplotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 77 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Soňa Šedivá, Ph.D..

Prohlášení autora o původnosti díla:

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh tepelně izolované komory a zajištění její regulace na konstantní teplotu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: **20. května 2013**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji panu Ing. Zdeňku Roubalovi, který byl můj konzultant bakalářské práce, který mě vedl, dával rady a dokázal mne vrátit zpět, když jsem šel špatným směrem.

Děkuji paní Ing. Soně Šedivé, Ph.D, která byla mým vedoucím práce a pomáhala mi především se zpracováváním po stylistické stránce.

Děkuji panu Ing. Tomáši Křížovi, který mi pomáhal při praktickém měření komory a především při simulacích v programu ANSYS, s kterým má letité zkušenosti.

Tímto Vám velice děkuji.

V Brně dne: **20. května 2013**

.....

podpis autora

Obsah

Seznam obrázků.....	10
Seznam grafů	11
Seznam Tabulek	11
Úvod	12
1 Peltierův článek [2] [5]	14
2 Teorie přenosu tepla [1].....	15
2.1 Vedení	15
2.2 Proudění	15
2.2.1 Laminární proudění	16
2.2.2 Turbulentní proudění.....	16
2.3 Záření.....	16
3 Teorie způsobů chlazení [1].....	18
3.1 Přirozené chlazení	18
3.2 Chlazení nuceným oběhem vzduchu	18
3.3 Chlazení nuceným oběhem kapaliny	19
3.4 Termoelektrické chlazení	19
3.5 Tipy pro zlepšení chlazení.....	22
4 Úvod do problematiky návrhu termoboxu	22
4.1 Pěnové materiály	22
4.2 Pěnový polystyren (EPS) [20].....	23
4.3 Výpočet tepelného odporu boxu	24
4.4 Ověření výpočtu teplotního odporu boxu simulací	26
4.4.1 Princip simulace	26
4.4.2 Význam prvků použitých v simulaci	27
4.4.3 Výpočet hodnot	27
4.4.4 Příprava simulace.....	28
4.4.5 Simulace.....	29
4.4.6 Výsledek a zhodnocení simulace	29

5	Měření na reálném termoboxu	31
5.1	Příprava měření [7]	31
5.2	Měření teploty	32
5.2.1	Výsledek měření pro výkon 5W	33
5.2.2	Výsledek měření pro výkon 10W	33
5.2.3	Porovnání jednotlivých měření.....	34
5.2.4	Zhodnocení měření.....	34
6	Simulace v programu ANSYS	35
6.1	Úvod [21]	35
6.2	Příprava simulace.....	35
6.2.1	Geometrie.....	36
6.2.2	Mesh.....	36
6.2.3	CFX [6] [8]	37
6.3	Časový průběh při výkonu odporu 5W.....	42
6.4	Zhodnocení simulace.....	42
7	Porovnání výsledků simulace a reálného měření.....	44
7.1	Zhodnocení odlišnosti simulace a reálného měření	47
8	Konstrukce skutečného řešení s Peltierovými články [3] [4]	49
8.1	Teoretický návrh	49
8.2	Praktická konstrukce	50
8.3	Měření na reálném boxu	51
9	Princip návrhu regulace.....	53
10	Řídicí elektronika	54
10.1	Výběr teplotních čidel	54
10.1.1	Testy	54
10.1.2	Výsledek testu	55
10.2	Návrh a realizace elektronických zapojení	55
10.2.1	H-Můstek [11].....	56
10.2.2	Řídicí elektronika	58
10.2.3	Umístění do krabičky a popis.....	59

11	Tvorba softwaru	61
11.1	Program pro mikroprocesor	61
11.1.1	Princip tisku na UART	62
11.1.2	Programování sensoru ADT7410	62
11.1.3	Čtení hodnoty čidel PT1000.....	62
11.1.4	Doplňky.....	63
11.1.5	Zpracování hodnot z PC [15] [16]	64
11.1.6	Ochrana při přerušené komunikaci	64
11.2	Program pro PC.....	64
11.2.1	Návod k ovládání programu	64
11.2.2	Princip programování	66
12	Naměřené výsledky	69
13	Závěr	74
	Literatura	75
	Seznam příloh	78

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Peltierův článek [22].....	14
Obr. 2 Model vodiče s různými součiniteli termoelektrické síly.....	20
Obr. 3 Model polovodiče s různými oblastmi vodivosti	20
Obr. 4 3D model teplotního boxu z polystyrénu	24
Obr. 5 Náčrt termoboxu s rozměry	25
Obr. 6 Schema zapojení obvodu	26
Obr. 7 Schema zapojení obvodu s hodnotami prvků	29
Obr. 8 Screen bloků programu z aplikace Agilent VEE.....	31
Obr. 9 Měření teploty uvnitř boxu – foto z laboratoře.....	32
Obr. 10 Bloky pro simulaci v prostředí Workbench.....	36
Obr. 11 Řez geometrie s nachystanou sítí.....	36
Obr. 12 Body pro měření grafů, mají stejné rozložení jako reálná čidla.....	38
Obr. 13 Řez celým termoboxem přes chladič - rozložení teploty v rovině Y	39
Obr. 14 Řez termoboxem ve více rovinách.....	39
Obr. 15 Příčný řez chladičem, znázorněno umístění odporů.....	40
Obr. 16 Rozložení teploty na vnitřní stěně termoboxu, v pravo pohled s chladičem.....	40
Obr. 17 Zobrazení rychlosti a směru proudění vzduchu.....	41
Obr. 18 Zobrazeno proudění uvnitř boxu, kuličky jsou zde pro lepší odhad rychlosti ..	41
Obr. 19 Možná finální podoba konceptu termoboxu včetně chlazení	49
Obr. 20 Blok se dvěma Peltierovými články připraven k osazení.....	50
Obr. 21 Konstrukce komory - štříkání pur pěnou	51
Obr. 22 Hotové řešení termoboxu včetně výměníku s chlazením	51
Obr. 23 Schéma rozdělení desek plošných spojů a připojených periferií.....	56
Obr. 24 Schéma zapojení H-Můstku v Multisimu	57
Obr. 25 Blokové schéma mikroprocesoru [13].....	58
Obr. 26 Reálné uspořádání elektroniky v krabičce	60
Obr. 27 Označení pinů mikroprocesoru CY8C27443 [13].....	61
Obr. 28 Princip měření teploty mikroprocesorem a PT1000 [14]	63
Obr. 29 Ikona pro spuštění programu	65
Obr. 30 Úvodní okno po spuštění programu TERMOBOX.....	65
Obr. 31 Hlavní okno programu pro ovládání teploty v Termoboxu.....	66

SEZNAM GRAFŮ

graf 1 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě [9]	23
graf 2 Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti [9].....	24
graf 4 Závislost teploty na čase pro výkon 5W	33
graf 5 Závislost teploty na čase pro výkon 10W	34
graf 6 Simulace ohřevu komory při výkonu 5W	42
graf 7 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny na chladiči	44
graf 8 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny na chladiči	45
graf 9 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny u stropu boxu	45
graf 10 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny u stropu boxu.....	46
graf 11 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny u dna boxu.....	46
graf 12 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny u dna boxu	47
graf 13 Skoková změna teploty čidla PT100 (keramická jímka).....	48
graf 14 Závislost teploty na čase reálného a konečného termoboxu	52
graf 15 Odezva na skok teploty ADT7410	54
graf 16 Odezva na skok teploty PT1000.....	55
graf 17 Ochlazování termoboxu plným výkonem	70
graf 18 Ohřívání termoboxu plným výkonem	70
graf 19 Ustalování teploty bez omezení překmitu	71
graf 20 Princip nastavení teploty s utlumením	71
graf 21 Chování termoboxu při změně žádané hodnoty	72
graf 22 Detail překmitu při nastavování žádané hodnoty	72
graf 23 Půl hodinový test udržení konstantní teploty 15 °C v komoře.....	73

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Tepelné izolanty [23].....	25
Tabulka 2: Teplotní a fyzikální konstanty použitých materiálů	27
Tabulka 3: Výkonová specifikace Peltierových článků.....	49

ÚVOD

Tepelné komory najdou využití nejen v elektrotechnice. Dnes jich je na trhu spousta, disponují velkým teplotním rozsahem, který může být od -70 °C až do několika stovek °C . Jsou však velmi náročné na konstrukci. V komoře je možné testovat chování součástek při různých teplotách, respektive jejich teplotní odolnost. Přesnost regulace těchto komor je obvykle s odchylkou $1 - 2\text{ °C}$. Cílem práce bude navrhnout a zkonstruovat jednodušší teplotní komoru s menším teplotním rozsahem od 10 do 60 °C a zajistit její regulaci na konstantní teplotu. Pokusím se také o dosažení odchylky do 2 °C od žádné hodnoty. Komora by měla v budoucnu sloužit pro testování teplotní závislosti magnetických materiálů.

První část práce bude věnována samotnému Peltierovému článku, kde bude vysvětlena jeho funkce a fyzikální možnosti.

Druhá a třetí část práce se bude zabývat teorií o přenosu tepla a způsobu, jakým se dají součástky chladit. Jednotlivé části se budou věnovat i matematickému popisu. Rozeberu zde detailněji termoelektrické chlazení, kterého Peltierův článek využívá.

Ve čtvrté části prozkoumám dostupné materiály pro návrh termoboxu, poté pro vhodný materiál provedu detailní rozbor a následně vyberu vhodný termobox. Následně budu počítat jeho teplotní odpor a pomocí programu Multisim budu simulovat a ověřovat správnost výpočtu.

Pátá část bude věnována měření na reálném termoboxu. V principu by měl být termobox testován při výhřevu 5W a 10W . Z ustálené teploty budu následně ověřovat tepelný odpor reálného termoboxu a také určovat výkon potřebný k vyhřátí.

V šesté části provedu simulaci pomocí programu ANSYS. Budu zde modelovat a nastavovat celou fyzikální podstatu modelu. Výstupem bude grafické zobrazení rozložení teploty v boxu i na jeho stěnách a odměřené charakteristiky teploty na čase ve stejných bodech, jako při reálném měření.

V sedmé části porovnáím výsledky z reálného měření a simulace. Budu zkoumat příčiny vzniku případných rozdílných teplot.

V osmé části začnu konstruovat navržený termobox. Osadím jej Peltierovými články a budu měřit jeho celkový teplotní rozsah.

Devátá část bude úvodem pro další kapitoly a uvedením do problému návrhu regulace.

Desátá část bude řešit hardwarový návrh veškeré elektroniky. Od výběru teplotních čidel, přes návrh výkonové části pro ovládání Peltierových článků, až po návrh komunikačního rozhraní mezi počítačem a H-Můstkem pomocí mikroprocesoru a umístěním do krabičky.

Jedenáctá část bude řešit návrh softwaru. Budu programovat jak mikroprocesor v jazyku C, tak počítačový program, ke kterému využiji C# a vytvořím aplikaci spustitelnou na počítačích se systémem Windows. Budu zde rozebírat princip programování a přidám i návod na ovládání programu.

Dvanáctá část bude zachycovat naměřené výsledky, zobrazovat detaily regulace a bude zde proveden půl hodinový test teplotní komory s udržení teploty na konstantní hodnotě.

V závěru budu hodnotit funkci reálného termoboxu, jeho přesnost, rozsah a funkčnost.

1 PELTIERŮV ČLÁNEK [2] [5]

Peltierův článek funguje na základě Peltierova jevu. Když prochází proud obvodem, se dvěma rozdílnými vodiči zapojenými v sérii, jedna z jejich styčných ploch se ochlazuje a druhá zahřívá. Nedostatkem je, že mají většinou velkou spotřebu a samy vyzařují hodně tepla, takže je potřeba chladit více, než kolik by vyžadovalo samotné chlazené zařízení. Tento jev lze užít i k výrobě elektřiny, při zahřívání a chlazení rozdílných stran produkuje termočlánek elektrický proud. Peltierovy články se pro běžné použití vyrábějí v různých velikostech a o různých chladicích parametrech. Jejich rozměry (čtvercová destička) jsou 10x10 až 60x60 mm, tloušťka je asi 3 až 6 mm. Maximální chladicí výkon se pohybuje od desetiny wattu až po stovky wattů. Maximální rozdíl teplot může dosahovat 60 až -85 °C (pokud bude teplý konec udržován na 30 °C, na studeném může být -30 až -45 °C).

Princip a další vlastnosti ohledně Peltierova jevu v souvislosti s Peltierovým článkem jsou vysvětleny v kapitole 3.4 o termoelektrickém chlazení.



Obr. 1 Peltierův článek [22]

2 TEORIE PŘENOSU TEPLA [1]

Teplo vzniká na přechodu PN a jeho odvod je uskutečněn 3 způsoby:

- tepelnou vodivostí
- prouděním
- zářením

2.1 Vedení

Je to přímá výměna tepla mezi přilehlými částmi. Objevuje se jen v pevných látkách. Tepelný tok je určen Fourierovým zákonem:

$$P = 1,16 \frac{\lambda}{\delta} (v_1 - v_2) S \quad (1)$$

- kde: P je tepelný tok [W]
 λ činitel tepelné vodivosti materiálu [W/m² °C]
 δ délka tepelné vodivosti materiálu [m]
 v_1, v_2 teplota ve dvou průřezích [°C]
 S průřez [m²]

2.2 Proudění

Neboli konvekce, probíhá v plynech nebo kapalinách. Je to pohyb tekutiny, při kterém se částice tekutiny pohybují svým neuspořádaným pohybem a zároveň se posouvají ve směru proudění. Tekutina (tj. plyn nebo kapalina) vždy proudí z místa vyššího tlaku (vyšší tlakové potenciální energie) do místa nižšího tlaku (nižší tlakové potenciální energie).

Newtonův zákon určí množství tepla při přenosu.

$$P = 1,16 \alpha_k S (v - v_a) \quad (2)$$

- kde: P je tepelný tok [W]
 α_k je činitel tepelného přenosu konvencí [W/m² °C]
 S plocha povrchu tepelné výměny [m²]
 v teplota povrchu [°C]
 v_a teplota okolního prostředí [°C]

Proudění je přirozené nebo umělé. A také laminární a turbulentní.

2.2.1 Laminární proudění

Je takové proudění vazké kapaliny, při kterém jsou proudnice rovnoběžné a nemísí se. Částice kapaliny se pohybují vedle sebe jakoby ve vrstvách - „destičkách“ (destička = lat. lamina), které se vzájemně nepromíchávají. Odtud také laminární neboli vrstevnaté proudění. Mezi jednotlivými vrstvami se předpokládá existence vnitřního tření a platnost vztahu Newtonova zákona viskozity.

2.2.2 Turbulentní proudění

Je takové proudění, při kterém se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku vírů (bouřit = lat. turbo - odtud také název proudění). Rychlosti jednotlivých částic tekutiny se nepravidelně mění, tzn. částice již nemají ve všech místech neměnnou rychlost, proudění tedy není stacionární.

2.3 Záření

Přenos je možný i ve vakuu, protože dochází k tepelné výměně prostřednictvím vyzařování elektromagnetických vln. Není vyžadováno hmotné médium.

Stefan-Boltzmanovým zákonem je možné určit:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{\Theta}{100} \right)^4 \quad (3)$$

kde E_0 je celkové množství energie vyzařené za časovou jednotku 1 m² absolutně černého tělesa [W/m²]

Θ absolutní teplota tělesa [K]

$C_0=5,67$ vyzařovací konstanta absolutně černého tělesa [W m⁻²K⁻⁴]

Množství tepla $P_{1,2}$ [W], které je vyzařováno povrchem S_1 k povrchu S_2 nebo do okolního prostředí, se určuje vzorcem (4).

$$P_{1,2} = 1,16\alpha_{1,2}(v_1 - v_2)S_1 \quad (4)$$

kde $\alpha_{1,2}$ je činitel tepelného přenosu záření od jednoho povrchu ke druhému [W/m² °C]

$$\alpha_{1,2} = 5,67\varepsilon\varphi_{1,2} \frac{\left(\frac{\vartheta_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{\vartheta_2 + 273}{100}\right)^4}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \quad (5)$$

kde $\varphi_{1,2}$ je činitel ozáření těles [-]

ε stupeň začernění vzájemně se ozařujících ploch [-]

Společný činitel tepelného přenosu α obsahuje složku konvekční i radiační a je roven:

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_r \quad (6)$$

Pro větší efektivnost je potřeba zvyšovat rozdíl teplot mezi zdrojem tepla a prostředím, které pohlcuje teplo. Je důležité, aby pohlcující prostředí přijímalo tepelný tok rychleji, než je ze zdroje vyzařováno.

3 TEORIE ZPŮSOBŮ CHLAZENÍ [1]

Chladič se používá u výkonu součástek nad 2 až 3W.

Způsoby pro odvod tepla:

- Přirozené chlazení
- Chlazení nuceným oběhem vzduchu
- Chlazení nuceným oběhem kapaliny
- Termoelektrické chlazení

Nelze jednoznačně říci, který způsob je nejlepší. Vždy to záleží na konkrétní situaci, dle požadované spolehlivosti, hospodárnosti a konstrukčních zvláštnotech.

3.1 Přirozené chlazení

Nejjednodušší, levné, spolehlivé chlazení polovodičové součástky. Předávání tepla zde probíhá pomocí tepelné vodivosti, přirozeného proudění a záření. Vhodné pro polovodičové součástky se ztrátovým výkonem do 20W. Předpokládá se zde použití dostatečně velkého chladiče. Nevýhodou jsou velké rozměry a váha.

3.2 Chlazení nuceným oběhem vzduchu

Účinnější nucený způsob chlazení, dovoluje značně zmenšit rozměry chladiče. Důležitá je délka chladiče ve směru pohybu chladícího média (obvykle vzduch).

Způsoby pohybu plynu:

- laminární ($Re < 2300$)
- turbulentní ($Re > 10^4$)
- přechodový od laminárního k turbulentnímu ($2300 < Re < 10^4$)

Laminární a turbulentní pohyb charakterizuje tzv. Reynoldsovo číslo Re :

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (7)$$

kde v je rychlost pohybujícího se média [$m\ s^{-1}$]

l velikost tělesa [m]

ν koeficient kinematické viskozity [$m^2\ s^{-1}$]

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (8)$$

kde μ koeficient dynamické viskozity [Nsm⁻²]
 ρ hustota pohybujícího se média [kg m⁻³]

Činitel přenosu tepla je mnohem větší u turbulentního pohybu, než laminárního, a proto se snažíme dosahovat turbulentního pohybu.

Činitel tepelného přenosu je pro chlazené nuceným oběhem vzduchu určen výrazem

$$\alpha_k = 0,055 \frac{\lambda_v}{L^{\frac{1}{4}}} \left(\frac{v}{\nu}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (9)$$

kde λ_v je tepelná vodivost chladícího média [Wm⁻¹K⁻¹]

3.3 Chlazení nuceným oběhem kapaliny

Použití kapaliny místo vzduchu. Při stejné rychlosti pohybu se přenos tepla zvětší více než stonásobně. Dovolí zmenšit rozměry a váhu zařízení. Nevýhodou je jeho složitost oproti vzduchovému chlazení.

Jako kapalina se obvykle používá voda. Je však použitelná pouze od bodu mrazu do bodu varu. Řešením je použití fluorouhlíkové kapaliny.

3.4 Termoelektrické chlazení

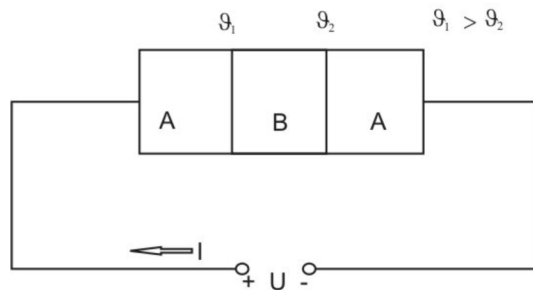
Dokáže snížit teplotu v malém objemu. Malé rozměry a váha. Polovodičové termoelektrické chladiče mají pohodlnou a pohotovou regulaci a snadno se převádějí z chlazení do ohřevu. Přírozené a vynucené chlazení se dá použít, pokud je teplota okolí menší než teplota součástky a chladiče. U termoelektrického chlazení je teplota chladiče menší než teplota okolí.

Termoelektrické ochlazování je založeno na Peltierově jevu, který je popsán vztahem:

$$Q = pI\vartheta \quad (10)$$

kde p je Peltierův činitel [-]

Prochází-li stejnosměrný proud obvodem, skládající se z vodičů s různými součiniteli termoelektrické síly, uvolňuje se teplo navíc k teplu Jouleovu. Obr. 2 demonstruje model takového vodiče.

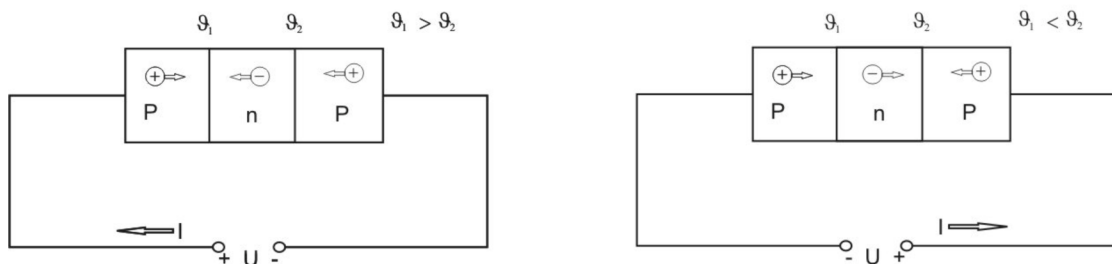


Obr. 2 Model vodiče s různými součiniteli termoelektrické síly

V místě spoje vodičů A a B se uvolňuje teplo navíc k teplu Jouleovu a v místě B a A je pohlcováno stejné množství tepla. Poté nastane stav, kdy $\vartheta_1 > \vartheta_2$.

Z fyzikálního pohledu je Peltierův jev přechod elektronů z vodiče s velkou energií nosičů do vodiče s menší energií. V místě styku vodičů se přebytečná energie uvolňuje v podobě tepla. Při opačném průchodu elektronů dochází k pohlcování tepelné energie.

Obdobný případ nastává v obvodu na Obr. 3 obsahující polovodiče s různým typem vodivosti.



Obr. 3 Model polovodiče s různými oblastmi vodivosti

Díry a elektrony v místě styku rekombinují a rekombinační energie se mění v teplo. Prochází-li proud opačným směrem, jsou elektrony z obsazeného pásu polovodiče typu P vrhány do volného pásu elektronové vrstvy. Jako výsledek vzniká elektron a díra s různým směrem pohybu.

Na vzniku páru elektron-díra se spotřebovává energie. Je-li směr proudu od polovodiče typu P do polovodiče typu N, energie se v místě styku uvolňuje, je-li směr proudu opačný, energie se pohlcuje.

Spotřebovaný výkon při termoelektrickém chlazení:

$$W = W_J + W_t \quad (11)$$

kde $W_J = S^2 R$

W_t je výkon, který se spotřebovává na překonání termoelektrické síly [J]

Za předpokladu, že budeme udržovat teplotu styku, kde se uvolňuje teplo, konstantní, bude se druhý styk ochlazovat tak dlouho, až součet tepla odebíraného z okolí Q_0 a tepla prostupujícího z článku Q_T nebude roven pohlcujícímu se Peltierově teplu Q_p .

Rozdíl teplot dosáhne maxima při proudu

$$I = \frac{(\alpha_1^* - \alpha_2^*)\vartheta_1}{R} \quad (12)$$

kde α^* je termoelektrická síla [WK^{-1}]

Je-li $Q_0 = 0$, je maximální rozdíl teplot termoelektrické baterie roven:

$$\Delta\vartheta_{\max} = \frac{1}{2} Z \vartheta_1^2 \quad (13)$$

kde

$$Z = \frac{(\alpha_1^* - \alpha_2^*)^2}{R_k} \quad (14)$$

je účinnost páru termoelektrické látky.

Pro praktické výpočty:

$$Z = \frac{\alpha^{*2} \sigma}{4\lambda^*} \quad (15)$$

kde

$$\alpha^* = |\alpha_1^*| + |\alpha_2^*| = 1,75 \text{ až } 2,3 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{V}}{\text{grad}} \right] \quad (16)$$

λ^* je činitel tepelné vodivosti termoelektrického článku [-]

σ činitel elektrické vodivosti [-]

Účinnost kovových článků je velmi malá a dají se použít spíše k měřicím účelům. Termoelektrické články na bázi polovodičových materiálů mohou mít účinnost značně vyšší.

Činitel chlazení ε charakterizuje účinnost termoelektrického chladiče. Určuje se z poměru množství tepla Q_0 odváděného, za časovou jednotku, termoelektrickou baterií a k tomu účelu spotřebované energie W :

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{W} \quad (17)$$

Činitel chlazení je závislý na rozdílu teplot $\vartheta_0 - \vartheta$ a na vlastnostech použitých polovodičových materiálů.

Pokud je rozdíl teplot malý je činitel chlazení ε velký, při $\vartheta_0 - \vartheta \rightarrow 0$, se blíží nekonečnu. Při velkých teplotních rozdílech se blíží nule.

Často je však vyžadována maximální chladicí výkonnost Q_{\max} na úkor hospodárnosti. Maximální výkonnost chlazení Q_{\max} je nepřímo úměrná činiteli chlazení ε .

Značnou nevýhodou a omezeností při použití Peltierových článků je velký příkon, cena, váha a rozměry při chlazení článků.

3.5 Tipy pro zlepšení chlazení

Zlepšit chlazení polovodičových součástek lze

- zvětšováním chlazeného povrchu
- zvětšením činitele přenosu tepla
- použitím materiálu s velkou tepelnou vodivostí
- zajištění vysokého stupně začernění
- zvýšení rozdílu teplot mezi součástkou a okolním prostředím

4 ÚVOD DO PROBLEMATIKY NÁVRHU TERMOBOXU

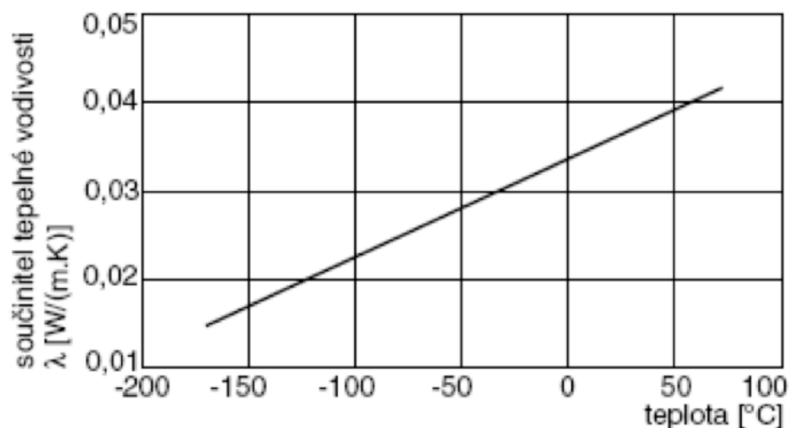
Na trhu jsou dostupné různá řešení a provedení. Pro moje řešení by se dala využít auto lednička, která Peltierova jevu využívá. Já jsem se však rozhodl pro vlastní řešení. Při průzkumu dostupných izolovaných boxů přicházela v úvahu termoska, pro svůj poměr velikosti, váhy a izolace. Svými rozměry však nesplňuje požadavek pro měření magnetických materiálů. Jako druhé nejlepší řešení je použít polystyrenový box, pro své dobré izolační vlastnosti. Nevýhodou jsou značné rozměry a nízký bod tání, který však pro nás není tak kritický.

Byl zvolen box o vnitřních rozměrech 210 x 160 x 210 mm (v, š, d). Síla stěn je 35 mm. S tímto boxem byly provedeny všechny následné teoretické simulace a měření.

4.1 Pěnové materiály

Izolaci v pěnových materiálech tvoří vzduch (případně i jiný plyn), který je uzavřený v dostatečně drobných bublinkách, tak malých, že v nich prakticky nedochází ke konvekci (přenosu tepla prouděním vzduchu). Teplo je pak přenášeno jen vedením

stěnami bublinek, plynem, který je vyplňuje, a také radiací (tepelným zářením). Tepelná vodivost těchto materiálů se více méně blíží tepelné vodivosti vzduchu. Tj. pohybuje se kolem $0,03$ až $0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. Protože tepelná vodivost plynů i radiální přenos tepla se s rostoucí teplotou zvyšuje, je tepelná izolace tím lepší, čím nižší je teplota.



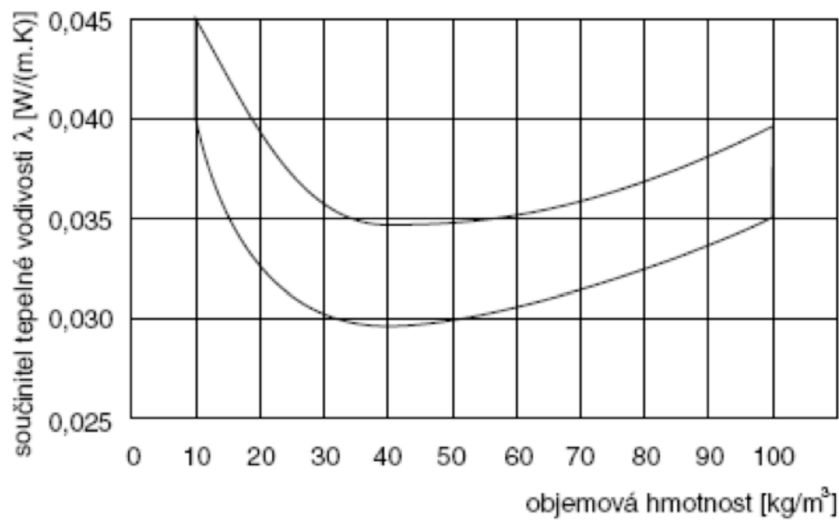
graf 1 Závislost součinitele tepelné vodivosti na teplotě [9]

4.2 Pěnový polystyren (EPS) [20]

Pěnový polystyren je dnes asi nejběžnější izolační materiál. Vyrábí se tak, že se malé kuličky PS obsahující 6 - 7 % pentanu, který slouží jako nadouvadlo, předpění, naplní se do formy. Zahříváním jsou „dopěněny“ tak, že vyplní celý prostor formy a vznikne velký blok pěnového polystyrénu. Bloky jsou pak rozřezány na desky požadované tloušťky. Zpravidla se k polystyrénu přidávají retardéry hoření pro zajištění samozhášivosti.

Součinitel tepelné vodivosti expandovaného polystyrénu λ se pohybuje od $0,037$ do asi $0,039 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, podle hustoty. Pevnost v tlaku je nejčastěji 100 až 200 kPa. Při delším styku s vodou pěnový polystyren nasákne. Nesnáší ultrafialové záření (na povrchu se rozpadá na prášek). V poslední době se setkáváme s pěnovým polystyrénem šedé barvy (značky jako Neopor, Grey wall apod.), který obsahuje přísadku velmi jemně mletého grafitu (v podstatě nanočástice) potlačujícího radiální přenos tepla. Součinitel tepelné vodivosti tohoto materiálu proto dosahuje ještě lepší hodnoty a to $\lambda = 0,032 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Hlavní výhodou pěnového polystyrénu je, že jde o poměrně pevný a z makroskopického hlediska homogenní materiál, který se snadno používá, má dobrý poměr užitné hodnoty k ceně a z hygienického hlediska je celkem neškodný. Hlavní nevýhodou je jeho omezená tepelná odolnost (zhruba do 70°C) a hořlavost.



graf 2 Závislost tepelné vodivosti na objemové hmotnosti [9]

4.3 Výpočet tepelného odporu boxu

Při teoretickém výpočtu tepelného odporu boxu jsem vycházel z rovnice (18), která udává množství tepla Q , které projde za čas τ plochou S do hloubky d , v ustáleném stavu.

$$Q = \lambda S \frac{\Delta T}{d} \tau \quad (18)$$

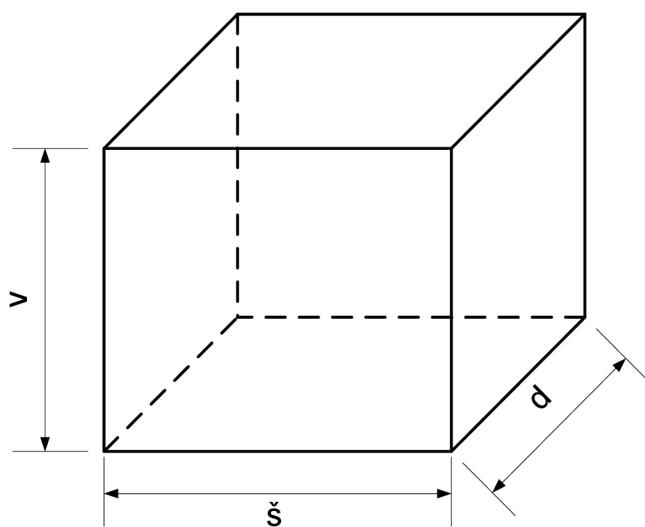
Následná úprava pro zdroj výkonu P v teplotním boxu:

$$P = \lambda S \frac{\Delta T}{d} \quad (19)$$

Teplotní box má tvar kvádru. Jeho náčrt je na obr. 4, rozměry na obr. 5



Obr. 4 3D model teplotního boxu z polystyrénu



Obr. 5 Náčrt termoboxu s rozměry

Termobox typ L
Materiál: EPS 150 lisovaný
Konstrukce: víko s podélným zámekem
Objem: 7,05 litrů
Vnitřní rozměry (d x š x v): 210 x 160 x 210 mm
Síla stěny, dna a víka: 35 mm

Plochu S termoboxu spočítám podle plochy kvádrů

$$S = 2 \cdot (d \cdot \text{š}) + 2 \cdot (v \cdot \text{š}) + 2 \cdot (v \cdot d) \quad (20)$$

$$S = 2 \cdot (0,21 \cdot 0,16) + 2 \cdot (0,21 \cdot 0,16) + 2 \cdot (0,21 \cdot 0,21) = 0,2226 \text{ m}^2 \quad (21)$$

Vyjádřím si teplotní odpor:

$$\frac{\Delta T}{P} = \frac{d}{\lambda \cdot S} = \frac{0,035}{0,035 \cdot 0,2226} = 4,4924 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (22)$$

Tabulka 1: Tepelné izolanty [23]

Skupina materiálů	Materiál	ρ_v [kg.m ⁻³]	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
Pěnoplastické látky	Pěnové polystyreny	30	0,035
	Extrudované polystyreny	30	0,030
	Pěnové polyuretany	35	0,027
	Pěnové polyetyleny	25	0,026
	Pěněné pryskyřice	40	0,040
	Pěněné PVC	60	0,043

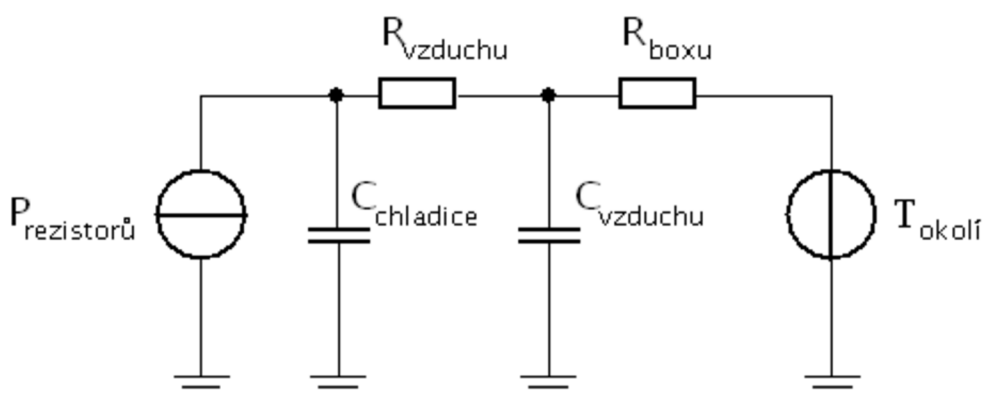
Vláknité materiály	Skleněná vlákna	50	0,038
	Mínérální vlákna	75	0,037
	Syntetická vlákna	160	0,065
	Ovčí vlna	30	0,039
Pěněné silikáty	Pěnové sklo	120	0,044
Mínérální materiály	Expandovaný perlit	75	0,060
	Expandovaný vermikulit	100	0,065
	Strusková pemza	500	0,130
	Keramzit	350	0,110

4.4 Ověření výpočtu teplotního odporu boxu simulací

4.4.1 Princip simulace

Od této simulace očekávám především ověření správnosti výpočtu odporu stěny boxu. Zanedbám zde několik faktů:

- Venkovní stěna boxu má stále konstantní (počáteční) teplotu
- Teplota vzduchu je ve všech místech boxu stejná
- Zanedbám větší rychlost ohřátého vzduchu
- Není brán v potaz koeficient přestupu, kdy teplo z boxu přestupuje do okolí



Obr. 6 Schéma zapojení obvodu

4.4.2 Význam prvků použitých v simulaci

P-rezistorů	Výkon ztracený na topných rezistorech, modelován proudovým zdrojem.
R-vzduchu	Tepeľný odpor medzi chladičom a teplotním čidlem umístěným na stěně teplotního boxu, nelze jej snadno vypočítat, ale lze jej změřit.
C-chladiče	Tepeľná kapacita chladiče, lze ji vypočítat z hmotnosti chladiče a měrné tepeľné kapacity hliníku, ze kterého je chladič vyroben.
C-vzduchu	Tepeľná kapacita vzduchu, lze vypočítat z objemu teplotního boxu, hustoty vzduchu a jeho měrné tepeľné kapacity.
R-boxu	Vypočtena výše, lze ji změřit z teplotního rozdílu vnitřních a vnějších stěně boxu.
T-okolí	Teplota vnějšího okolí, napěťový zdroj.

4.4.3 Výpočet hodnot

Tabulka 2: Teplotní a fyzikální konstanty použitých materiálů

Materiál	Materiálové konstanty	
Vzduch	Měrná tepeľná kapacita c	1004 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
	Hustota ρ	1,29 [kg·m ⁻³]
Hliník	Měrná tepeľná kapacita c	896 [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]
	Hustota ρ	2700 [kg·m ⁻³]

4.4.3.1 Výkon rezistorů

Z důvodu ustáleného přechodného děje a nízké teploty tavení polystyrénu, jsem si zvolil výkon rezistorů 5 W.

4.4.3.2 Odpor vzduchu

Lze nejjednodušeji určit změřením. Měření probíhalo nepřímou. Box jsem nechal vytápět odpory o výkonu 5W, až do ustálené hodnoty. Teplota chladiče se ustálila na 70°C, teplota na vnitřní stěně boxu pak byla 48,5°C.

Pro výpočet uvažuji:

$$\frac{\Delta T}{P} = \frac{70 - 48,5}{5} = 4,3 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (23)$$

pozn.: Jelikož se jedná o ΔT , nemusím teplotu převádět na Kelviny.

4.4.3.3 Kapacita chladiče

Chladič je vyroben z hliníku o hmotnosti 0,221 kg.

$$C_{\text{chladiče}} = c_{\text{Al}} \cdot m_{\text{chladiče}} = 896 \cdot 0,221 = 198 \text{ J} \quad (24)$$

4.4.3.4 Kapacita vzduchu

Nejprve vypočítám objem vzduchu v termoboxu o vnitřních rozměrech 160 x 210 x 210 mm. Od toho odečtu objem vzduchu a topných odporů.

Protože by byl výpočet objemu chladiče značně ztížen, při počítání hmotnosti jednotlivých žeber, budu vycházet z jeho hmotnosti a hustoty hliníku. Rezistory mají rozměry 51 x 51 x 21 mm a jsou dva.

$$V_{\text{vzduchu}} = V_{\text{boxu}} - V_{\text{chladiče}} - V_{\text{odporu}} = V_{\text{boxu}} - \frac{m}{\rho} - 2 \cdot V_{\text{odporu}} \quad (25)$$

$$V_{\text{vzduchu}} = 0,16 \cdot 0,21 \cdot 0,21 - \frac{0,221}{2700} - 2 \cdot 0,051 \cdot 0,021 \cdot 0,021 \quad (26)$$

$$V_{\text{vzduchu}} = 6,9292 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{vzduchu}} &= c_{\text{vzduchu}} \cdot V_{\text{vzduchu}} \cdot \rho_{\text{vzduchu}} = 1004 \cdot 6,9292 \cdot 10^{-3} \cdot 1,29 \\ &= 8,9744 \text{ J} \end{aligned} \quad (28)$$

4.4.3.5 Odpor boxu

Ten již mám spočítaný z kapitoly 4.3 Výpočet tepelného odporu boxu.

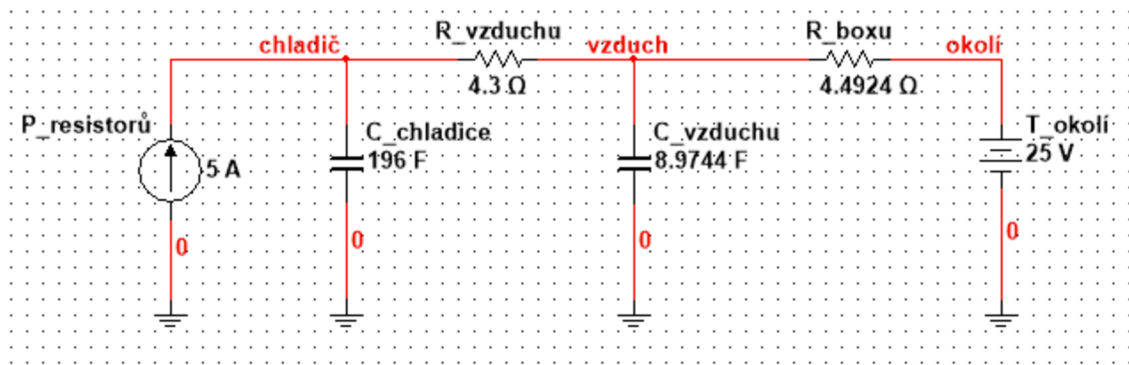
$$\frac{\Delta T}{P} = 4,4924 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (29)$$

4.4.3.6 Teplota okolí

Při simulaci budu uvažovat teplotu okolí 25 °C.

4.4.4 Příprava simulace

Obvod byl odsimulován pomocí programu NI Multisim 12.0, od firmy National Instruments.



Obr. 7 Schema zapojení obvodu s hodnotami prvků

V simulaci je důležité nezapomenout nastavit počáteční podmínky. V celém obvodu musí být 25V, jako by právě bylo 25°C. Kondenzátory jsou před simulací nabity na 25V. Abych viděl postupné zvyšování napětí v čase, respektive zahřívání, je u vodičů důležité nastavit: Při kliknutí na vodič – Properties – záložka Simulation settings, zde „Use IC for Transient Analysis“ a zadat 25.

4.4.5 Simulace

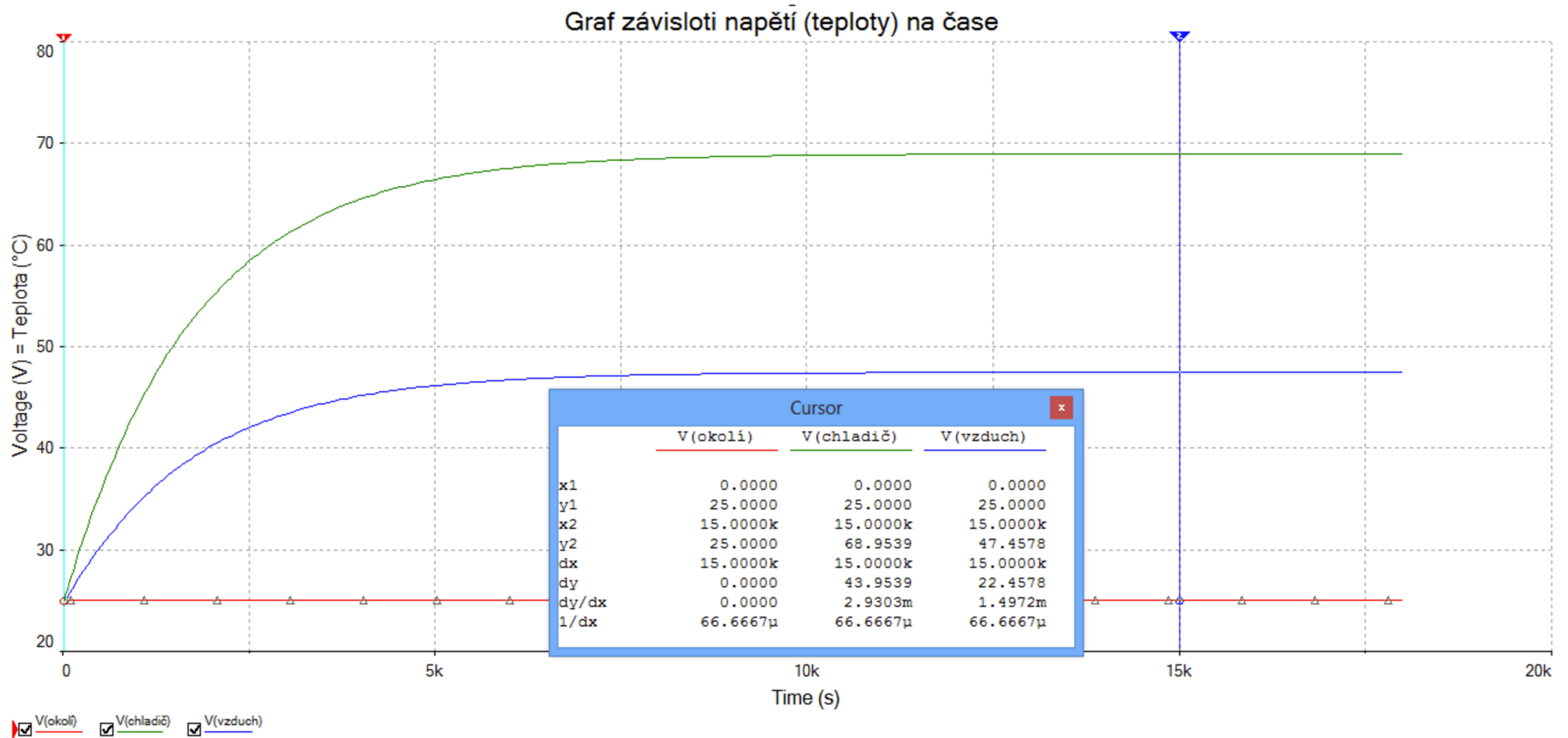
Zvolil jsem časovou analýzu „Transient Analysis“. Abych viděl ustálenou teplotu, zvolil jsem čas simulace 5 hodin tj. 18000 s. Jako výstupní proměnné jsem zvolil napětí v uzlu chladič, vzduch a okolí. Odsimulovaná závislost je uvedena viz graf 3.

4.4.6 Výsledek a zhodnocení simulace

V graf 3 je vidět postupné nabíjení kondenzátorů a tedy postupné zvyšování teploty. V čase 15000s, tj. po cca 4 hodinách, se velikost napětí již nemění. Konečné hodnoty lze odečíst z kurzorů. Teplota okolí zůstala na předpokládaných 25°C, teplota v boxu se postupně zvyšovala až na 47°C a teplota chladiče se ustálila na 69°C.

Jelikož jsem odměřil odpor vzduchu reálnou soustavou, zjistil jsem i přibližné hodnoty teplot. Vycházel jsem z teploty chladiče 70°C a teploty v boxu 48,5°C. Tyto hodnoty se od nasimulovaných liší maximálně 1,5°C.

Předchozí výpočet odporu boxu byl správný.



graf 3 Graf závislosti napětí (teploty) na čase


```

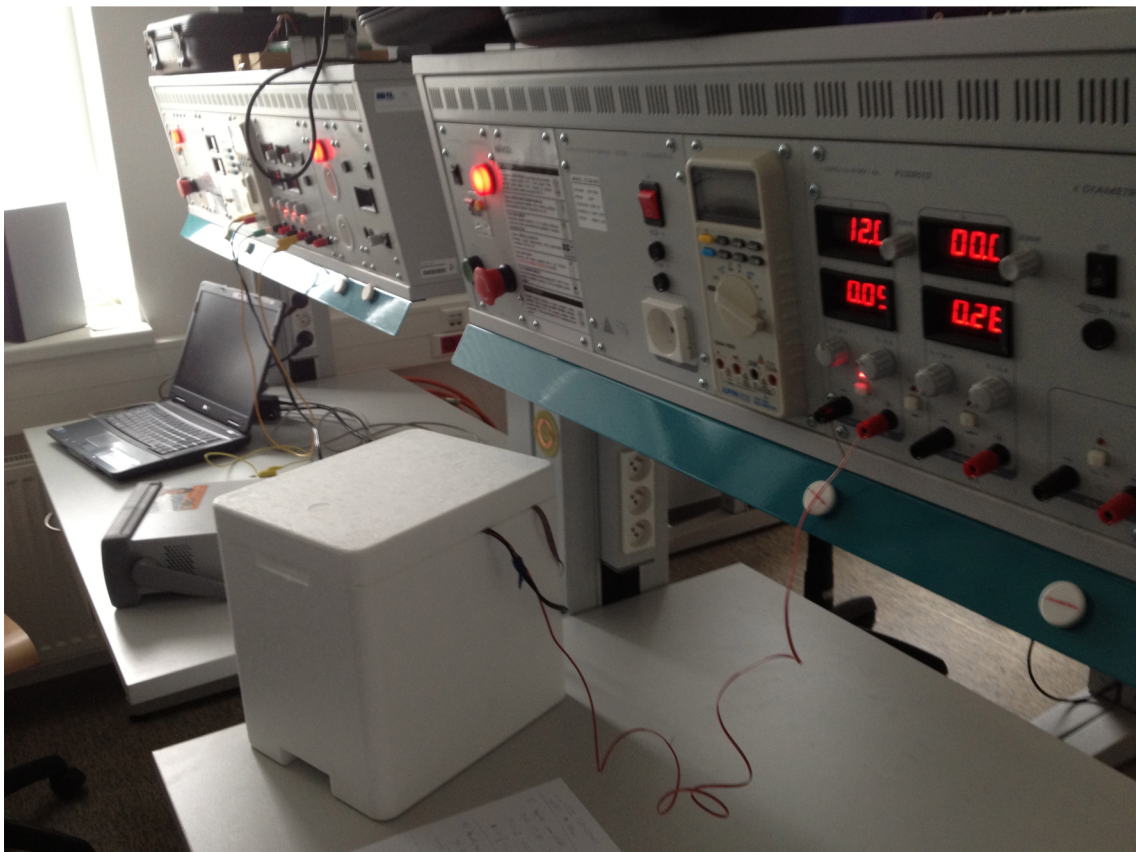
Function TePt100 (Rx)
    Dim A,B as double
    A= 3,90802e-3
    B= -5,802e-7
    TePt100 = (sqr (B*Rx-100*B+25*A^2) -5*A) / (10*B)
End Function

```

Poté již byly známy hodnoty teplot.

5.2 Měření teploty

Měření teploty probíhalo tak, že jsem nechal odpory vytápět celou komoru. Měření jsem provedl pro celkový výkon 5W a 10W. Vždy jsem počkal, až se teplota v komoře ustálí a poté se vytápění vypnulo a odměřila se i charakteristika ochlazení, kdy box ztrácí vnitřní teplo. Teplota v komoře se ustálí, když dojde k vyrovnání se vyzařovaného výkonu z rezistorů a ochlazovacím podmínkám mimo komoru.



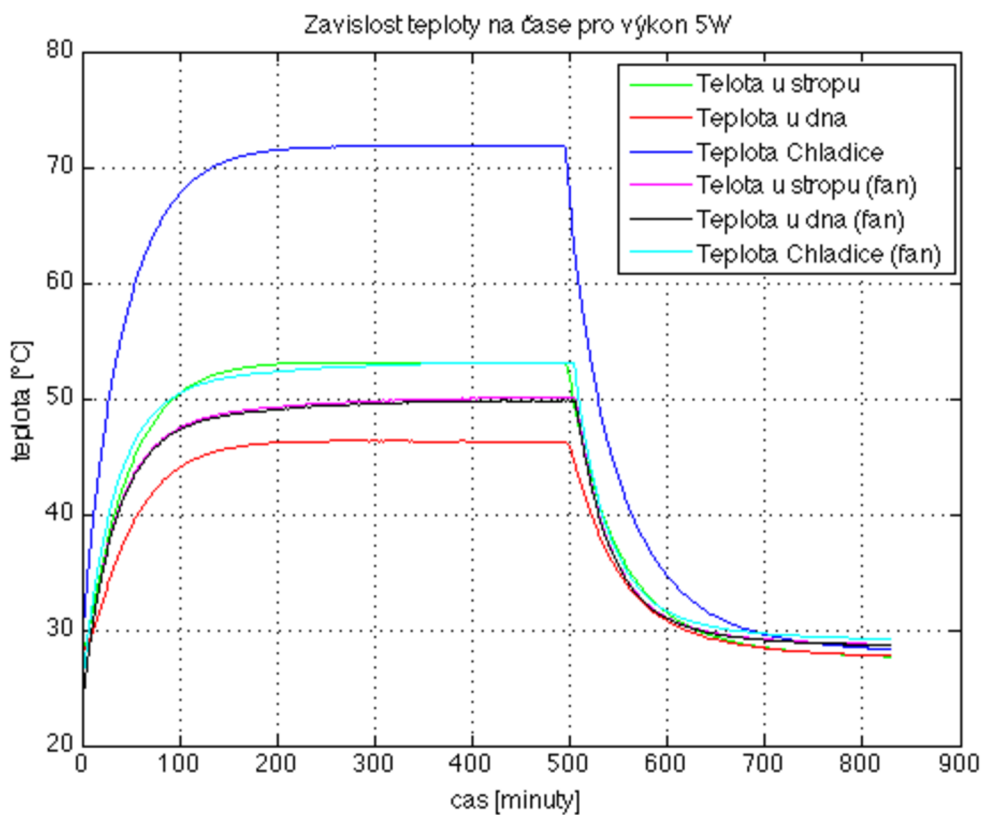
Obr. 9 Měření teploty uvnitř boxu – foto z laboratoře

5.2.1 Výsledek měření pro výkon 5W

Z grafu 4 je vidět ohřev vzduchu v komoře v závislosti na čase. Jsou zde zakresleny průběhy na chladiči, u dna termoboxu a u stropu termoboxu, navíc je zde porovnání při použití ventilátoru (v popisku zkratka „fan“).

V grafu 4 je šest křivek. Podstatné je si všimnout teploty na chladičích, kdy teplota chladiče s ventilátorem klesne blíže k celkové teplotě v komoře, a to ze 72°C na 53°C. Dále v zapojení bez ventilátoru je vidět teplotní rozdíl mezi stropem (53°C) a dnem (46°C) asi 7°C. Naopak v zapojení s ventilátorem je maximálně 0,2°C.

Z měřítka na časové ose je vidět, že přechodný děj odezní po 200 minutách.



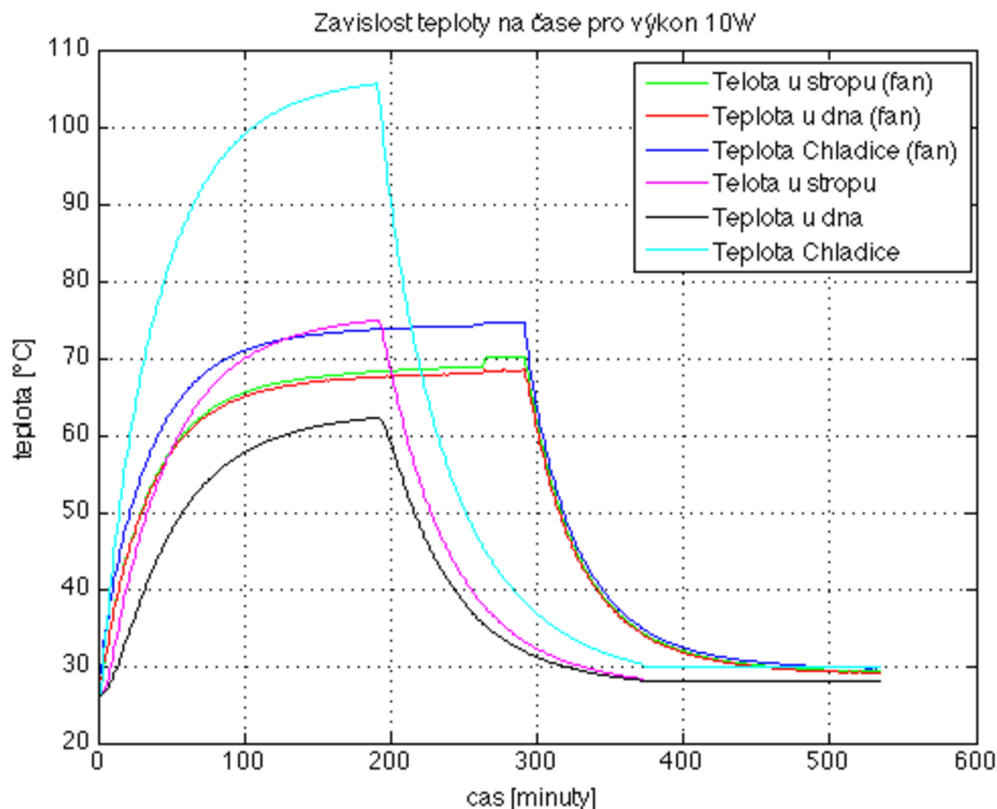
graf 4 Závislost teploty na čase pro výkon 5W

5.2.2 Výsledek měření pro výkon 10W

Pro objektivnost měření jsem provedl ještě jedno měření a to pro výkon 10W. Výsledek je v graf 5. Měření probíhalo stejně, jako v kapitole 5.2.1.

V grafu 5 je šest křivek. Podstatné je si všimnout teploty na chladičích, kdy teplota chladiče s ventilátorem klesne blíže k celkové teplotě v komoře a to ze 105°C na 75°C. Dále v zapojení bez ventilátoru je vidět teplotní rozdíl mezi stropem (75°C) a dnem (62°C) asi 13°C. Naopak v zapojení s ventilátorem je maximálně 1°C.

Z měřítka na časové ose je vidět, že přechodný děj odezní po 200 minutách.



graf 5 Závislost teploty na čase pro výkon 10W

5.2.3 Porovnání jednotlivých měření

Z grafu 4 a graf 5 vyplývá, že pokud chci dosáhnout stejné teploty v celém termoboxu, musím použít ventilátor. Díky ventilátoru se navíc teplota v komoře přiblíží k teplotě u stropu, tedy té vyšší, takže je v komoře celkově větší teplota než bez ventilátoru. Naopak se sníží teplota na chladiči.

Při porovnání výkonu 5W a 10W je vidět nelineární závislost teploty na výkonu. Při 5W jsem zahřál komoru o 25°C, a však při dvojnásobném výkonu tj. 10W jsem neohřál vzduch v komoře o 50°C, ale o 45°C.

Při měření teploty v bezprostřední blízkosti boxu, jsem naměřil její zvýšení maximálně o 1°C při výkonu 5W a o 2,5°C při výkonu 10W.

5.2.4 Zhodnocení měření

Měřením jsem získal 3 hlavní hodnoty. Teplotu u dna boxu, u stropu a přímo na chladiči, hned u zdroje vyzařování tepla, tedy u rezistorů. Potvrdil jsem si fyzikální zákon, že teplo stoupá vzhůru a studený vzduch se drží u dna. Dále při použití

ventilátoru se sníží teplotní rozdíl mezi chladičem a okolím a blíží se k sobě hodnoty teploty u dna a u stropu termoboxu. Je tedy více než vhodné jej použít.

Zajímavým poznatkem, je možnost dosažení teploty 50°C v celé komoře, při vytápění pouhými 5W a 70°C při vytápění 10W. Při použití většího výkonu by se děj značně urychlil, ale nemohl bych zjistit ustálenou teplotu, neboť bych dosáhl teploty tavení polystyrénu, která začíná být kritická při 70°C.

Díky ustáleným hodnotám se dá lehce spočítat odpor termoboxu. Pokud vím, že teplota se ustálila na 50°C při výkonu 5W a okolní teplota je 25°C, je zřejmé, že tepelný odpor je $(50-25)^\circ\text{C} / 5\text{W}$ tj. 5 K W^{-1} . Do vztahu lze dosadit teplotu ve $^\circ\text{C}$, neboť ve vztahu je podíl, kde dojde k vyrušení jednotky.

6 SIMULACE V PROGRAMU ANSYS

6.1 Úvod [21]

ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující:

- strukturální a termodynamickou analýzu
- analýzu proudění kontinua
- analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí
- akustické analýzy

Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multifyzikálnímu pojetí programu ANSYS ho lze také zahrnout do jediné společné analýzy. ANSYS umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale i výpočty spolehlivosti díky parametrizovaným výpočtovým modelům, citlivostní a optimalizační analýzy.

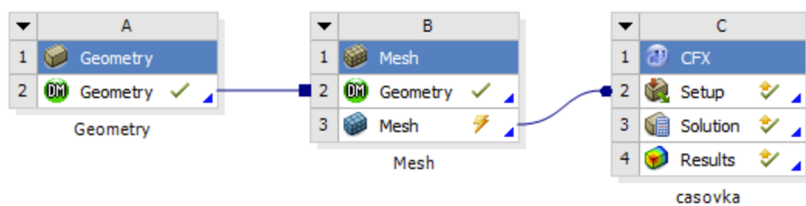
ANSYS patří od počátku své existence (již přes 40 let na trhu) ke špičkovým inženýrským systémům využívajících metodu konečných prvků (FEM).

Součástí instalace programu ANSYS je i program Workbench, který je grafickou nadstavbou programu ANSYS.

Jelikož při simulaci bylo třeba zohlednit i rychlost proudění v boxu, využil jsem modulu (bloku) CFX ke konečné simulaci.

6.2 Příprava simulace

Prostředí Workbench umožňuje sestavit projekt z jednotlivých bloků propojených za sebe. Je v nich vše přizpůsobeno určité a konkrétní simulaci. Naše simulace je znázorněná na Obr. 10. Následně popíšu nastavení v jednotlivých blocích.



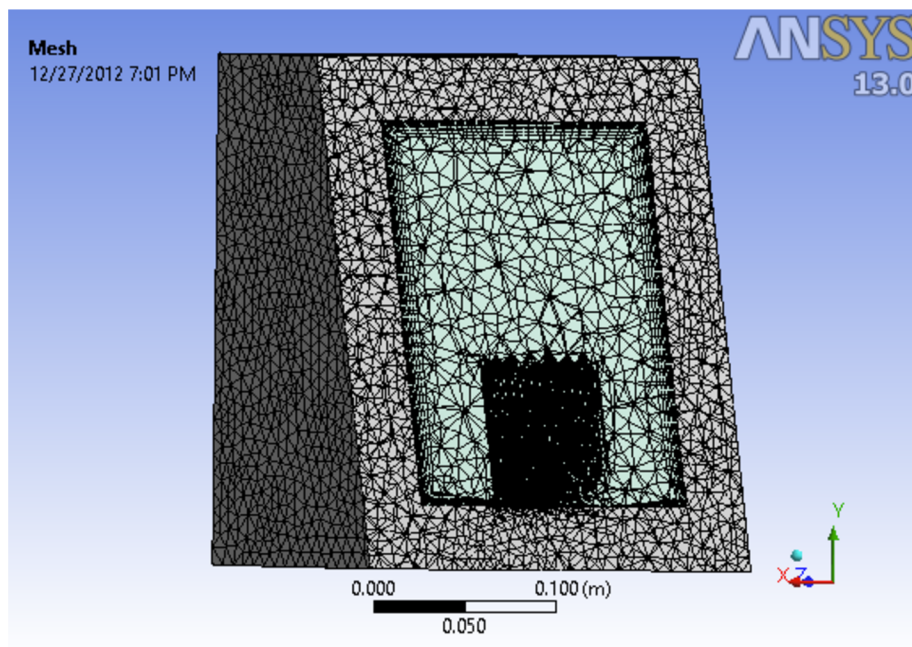
Obr. 10 Bloky pro simulaci v prostředí Workbench

6.2.1 Geometrie

Geometrie je nakreslená v programu Solid Works a následně importována do Workbenche. 3D model je nakreslený v měřítku 1:1. Pouze při kreslení chladiče, byla žebra zprůměrována, neboť všechny nemají úplně stejný průměr. Také byla zanedbána kulatost rohů termoboxu.

6.2.2 Mesh

Blok Mesh (sít') slouží pro vytvoření sítě konečných prvků. Vytvořená síť konečných prvků bude použita pro výpočet proudění v bloku CFX. Velikost sítě určuje především detailnost (přesnost) řešení a časovou náročnost při výpočtu. Tvar prvku (Elementu) byl nastaven na trojboké jehlany. Při nastavení velikosti prvků byla síť zjemněna především u vnitřní stěny termoboxu, aby bylo detailněji zachyceno proudění.



Obr. 11 Řez geometrie s nachystanou sítí

Celkové nastavení velikosti prvků je následující:

- Termobox 10 mm
- Vzduch 15 mm
- Odpory 5 mm
- Kritická místa na chladiči 0,5 mm (žebra, okraje)

Konečný počet prvků je 239 572 a počet uzlů je 59 254.

6.2.3 CFX [6] [8]

Blok CFX pojmenovaný „casovka“ umožňuje do simulace oteplení boxu zahrnout i proudění. V záložce **Setup** se zvolí materiály, parametry, konstanty a celá fyzikální podstat modelu. V **Solution** se vše spočítá. Zde je možné nastavit kolik jader procesor při výpočtu využiji, popřípadě použijeme více počítačů. Záložka **Results** je určena pro práci s výsledky. Umožňuje zobrazit výsledky pomocí grafů, tabulek nebo konturové zobrazení výsledků.

6.2.3.1 Setup

V této části jsem nastavil na všechny části modelu (domény) počáteční podmínky pro čas $t = 0$ s teplotu 25 °C a typy materiálů. Na vnější stěny boxu jsem nastavil okrajovou podmínku Heat Trans. Coeff (koeficient přestupu tepla). Je udávána v tabulkách v rozmezí jednotek až desítek $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ podle materiálu a okolního prostředí. Je určen spíše experimentálně na hodnotu $30\text{ [W m}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$. Má velký vliv na hodnotu teploty uvnitř termoboxu.

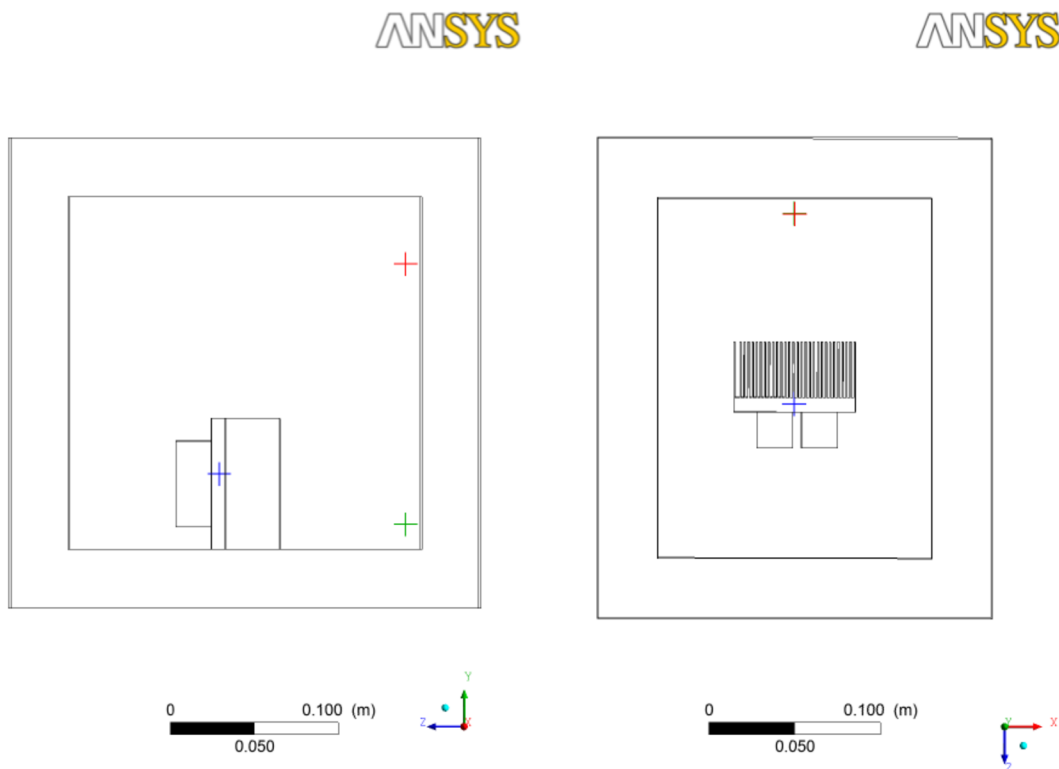
Na objemy představující Odpor je zadán objemový zdroj tepla jako Sources, nebo-li zdroj. Tahle hodnota je získána jako podíl výkonu a objemu rezistoru. Pro daný objem odporu a výkon 5 W má hodnotu 111155 Wm^{-3} . V nastavení je zahrnuto, že přenáší své teplo do chladiče i do okolí. Objemu uvnitř boxu byl přiřazen Vzduch při pokojové teplotu 25 °C . Tlak je 1 atm a gravitační zrychlení $9,81\text{ ms}^{-2}$, které je potřeba pro výpočet přirozeného proudění. Materiál boxu byl zvolen polystyren s tepelnou vodivostí $0,035\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Proudění je laminární. Pokoušel jsem se i o jiné, ale laminární dává nejlepší výsledky. Typ analýzy je zvolen na celkový čas 5 hodin s krokem 1 minuta. Reálné měření je měřeno stejně.

6.2.3.2 Solution

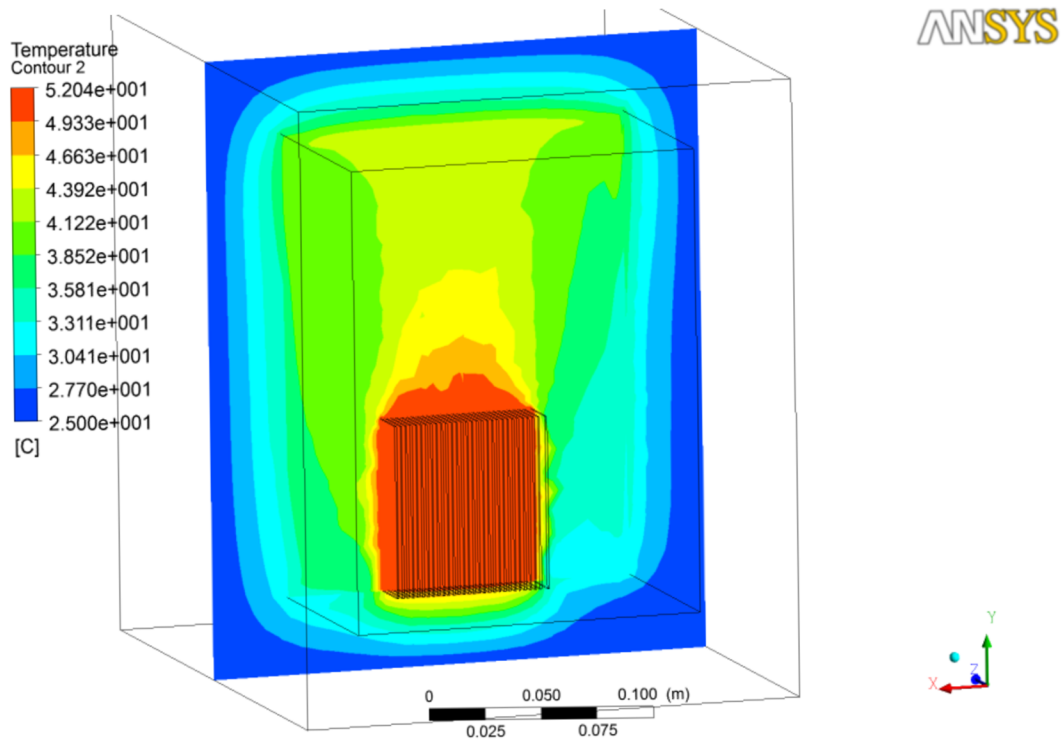
Zde se generuje celý model a spustí výpočet. Nastavení je ponecháno původní, pouze je zatrhnuta dvojitá přesnost. Výpočet se provedl na 2 jádrech procesoru Intel Core 2 Duo @2,4 GHz s 8 GB RAM a trval 12 hodin. Verze programu ANSYS je 13.0.

6.2.3.3 Results

U již spočítaného modelu mohu nyní vyhodnotit všechny možné fyzikální veličiny ve všech bodech. Mě zajímá teplota a rychlost proudění. Na mnou přidaných rovinách v Obr. 13 a Obr. 14 zobrazím teplotu pomocí kontur (Contour). Vykreslí se rozložení teploty na zvolené rovině. Přidám zde i Streamline (proudnice), které ukáží směr a rychlost proudění. Lze zde nastavit hustotu bodů pro zobrazení Streamline (proudnic). Nakonec ještě přidám body (Point) na ty místa, kde jsou naše teplotní čidla při reálném měření. V těchto bodech jsou vykresleny grafy teploty.

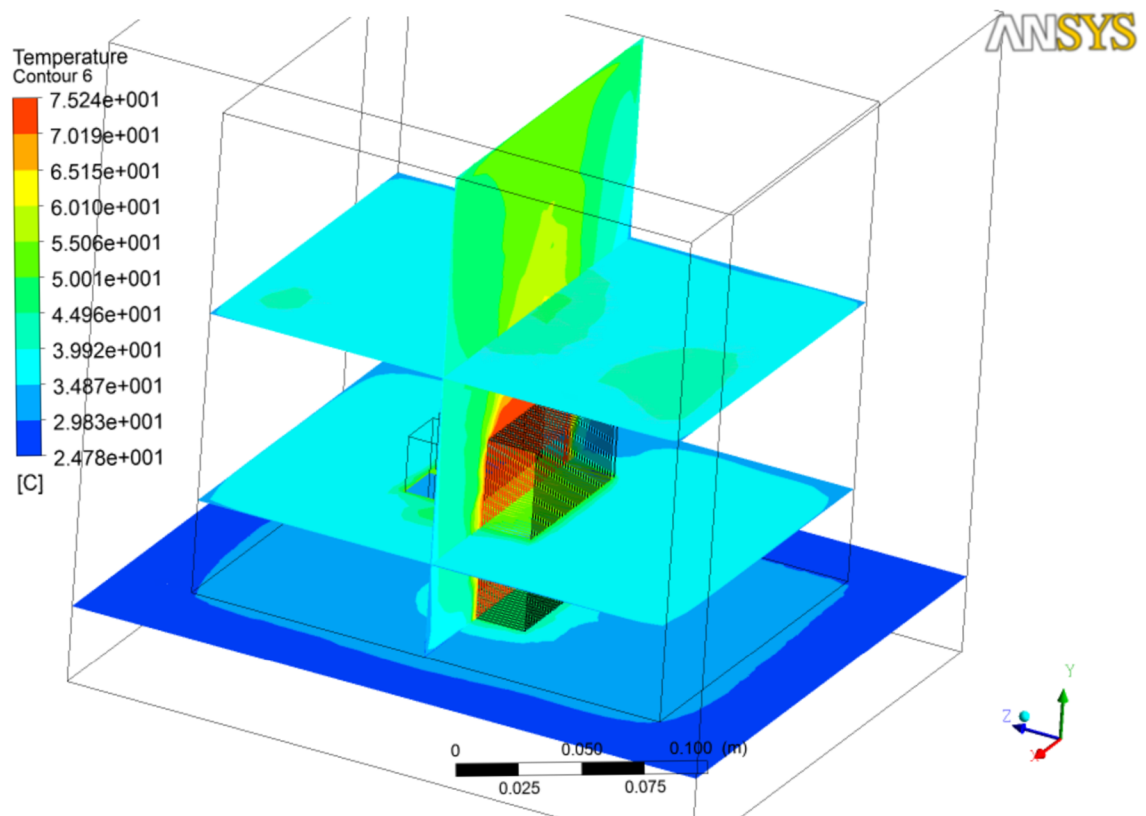


Obr. 12 Body pro měření grafů, mají stejné rozložení jako reálná čidla

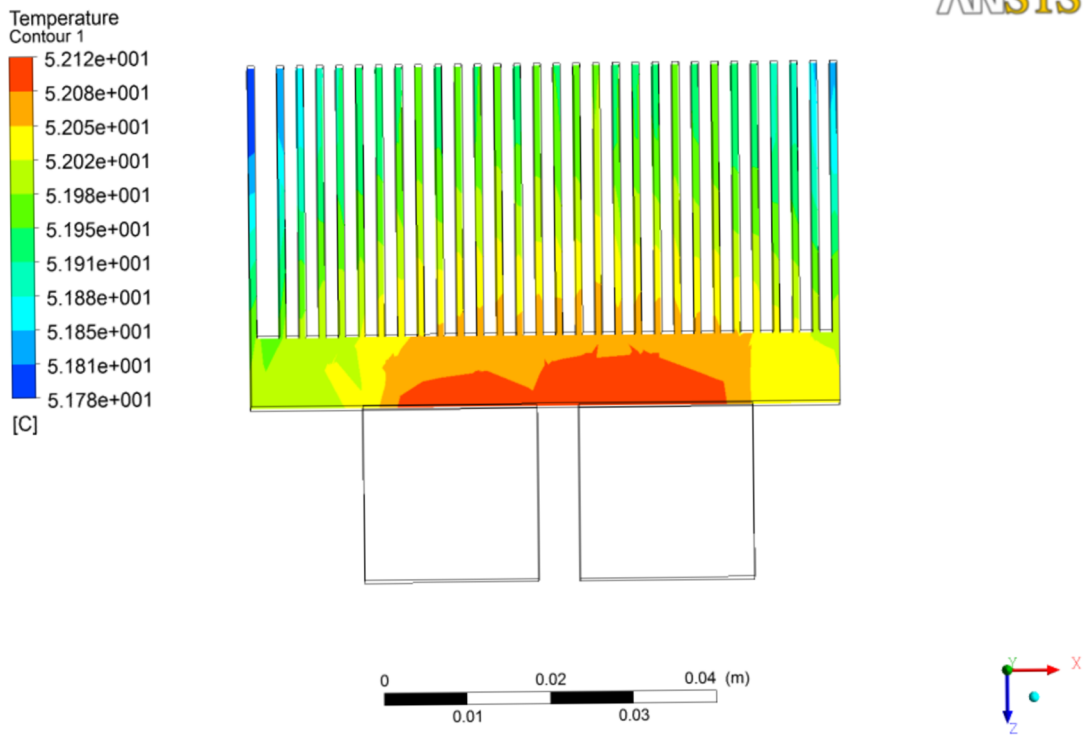


Obr.

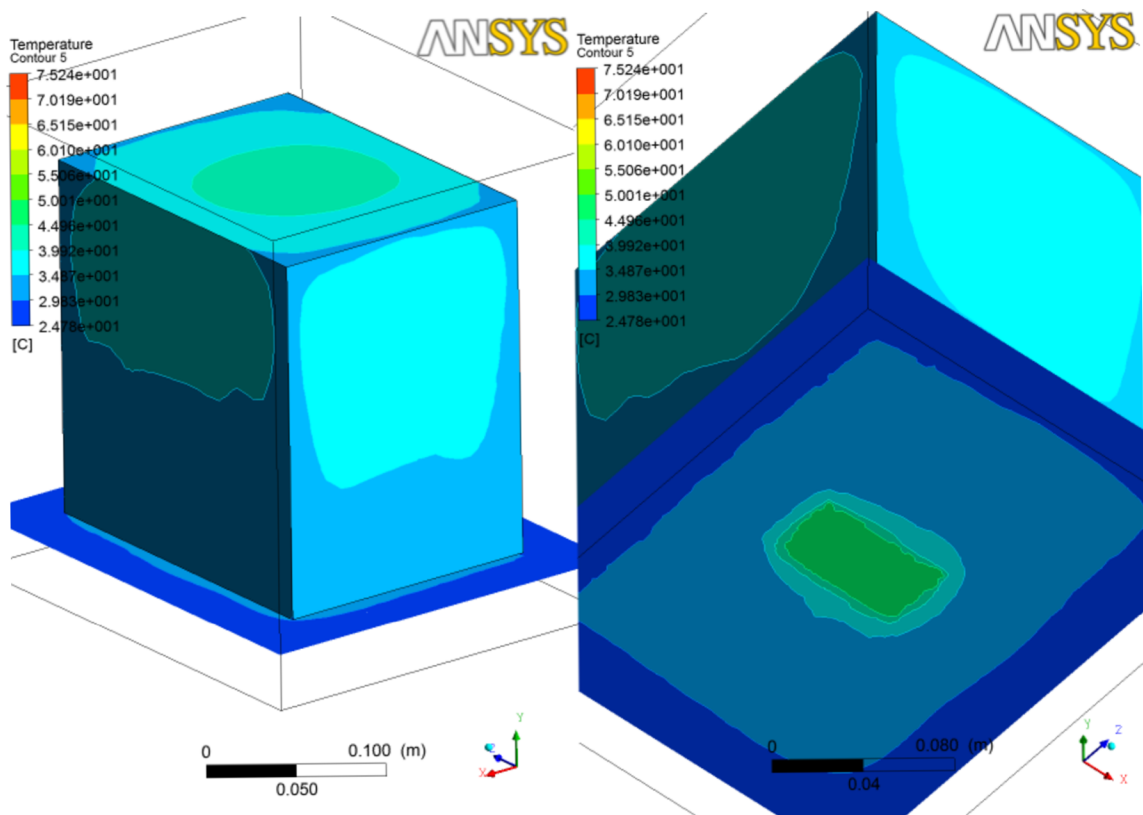
Obr. 13 Řez celým termoboxem přes chladič - rozložení teploty v rovině Y



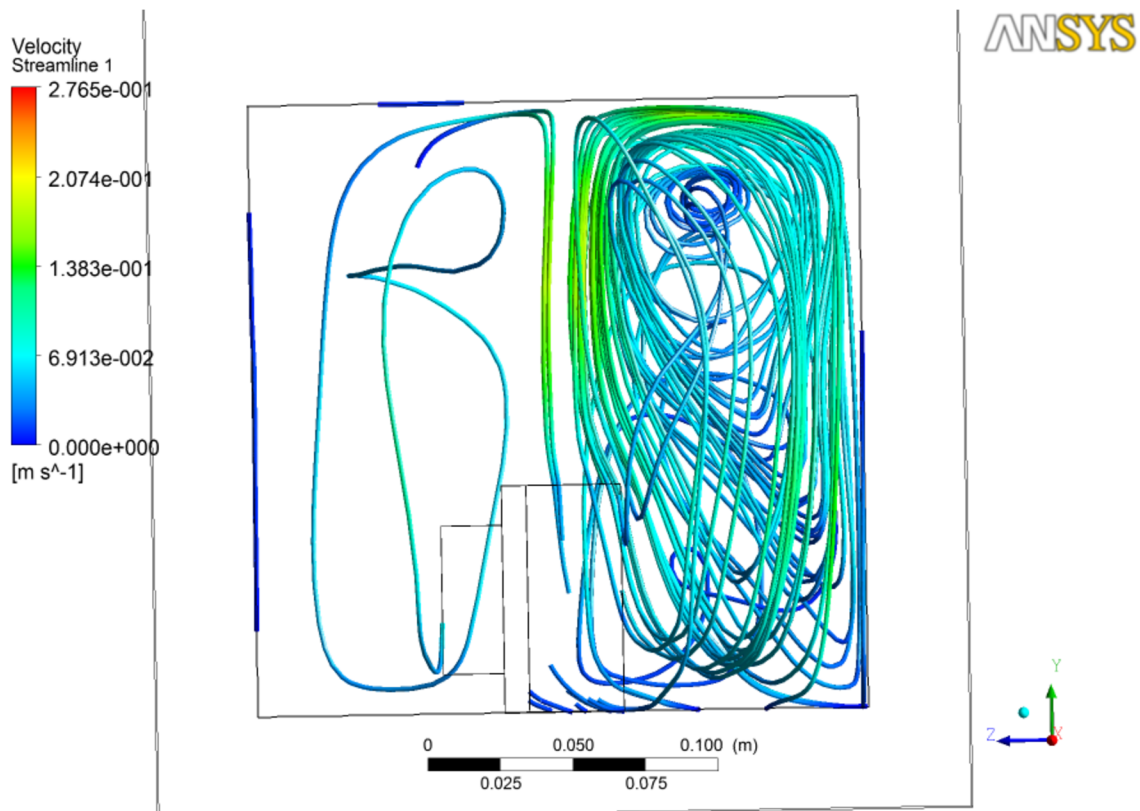
Obr. 14 Řez termoboxem ve více rovinách



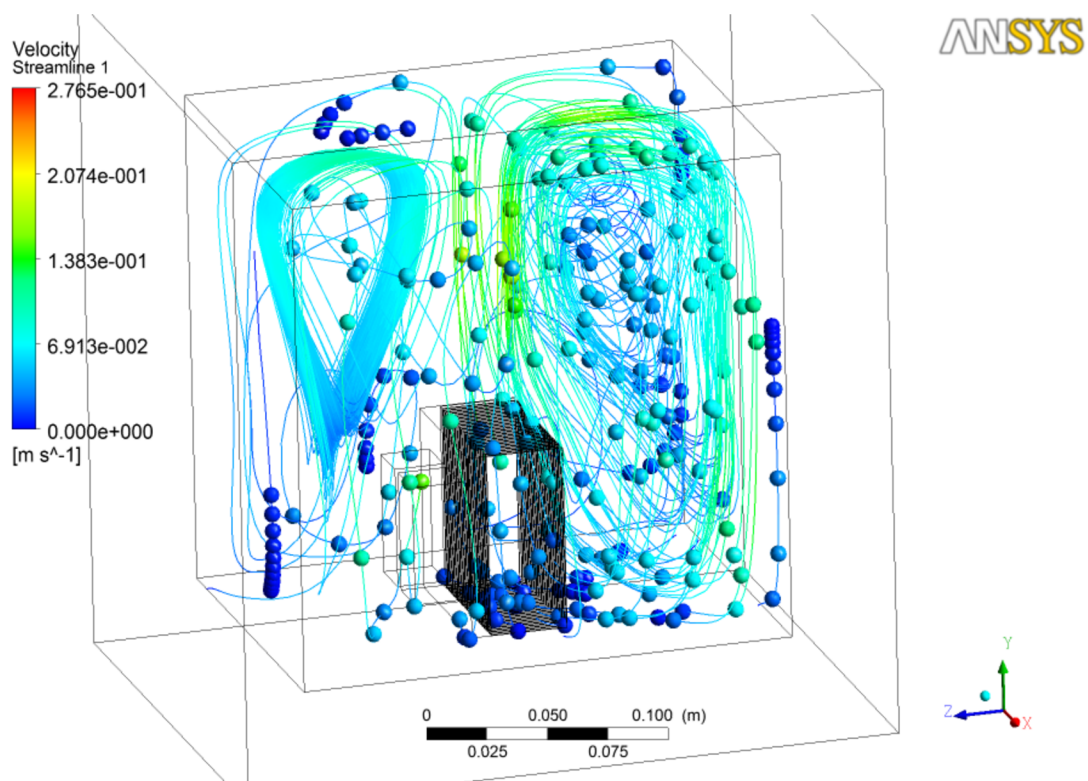
Obr. 15 Příčný řez chladičem, znázorněno umístění odporů



Obr. 16 Rozložení teploty na vnitřní stěně termoboxu, v pravo pohled pod chladičem



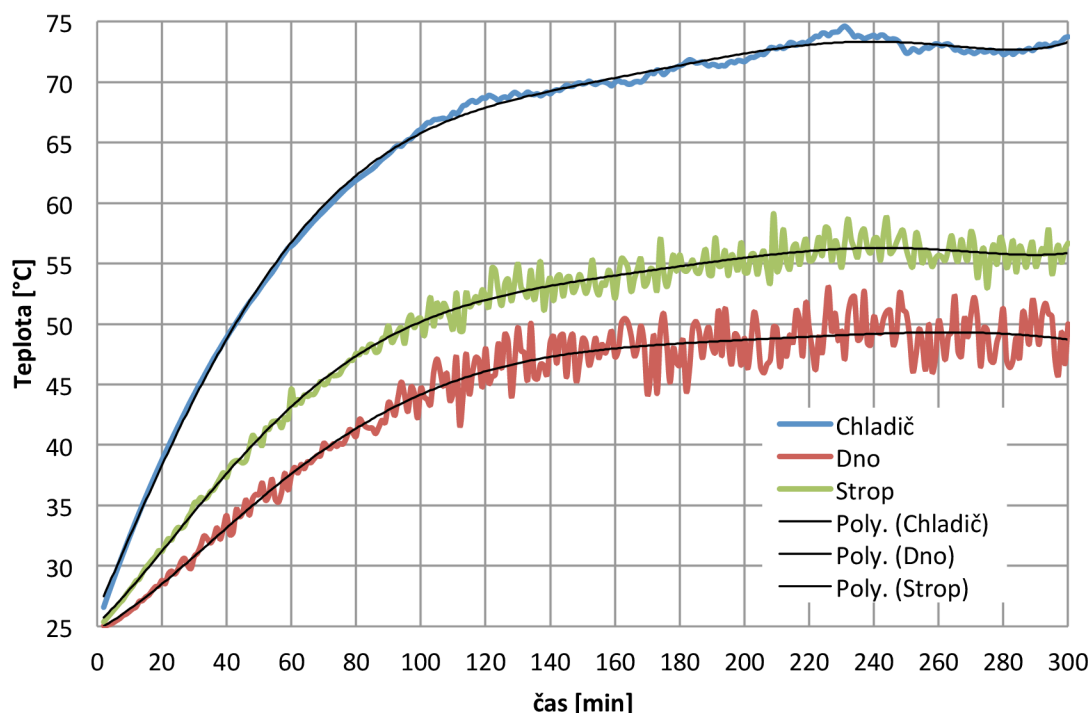
Obr. 17 Zobrazení rychlosti a směru proudění vzduchu (v legendě hodnoty rychlosti)



Obr. 18 Zobrazeno proudění uvnitř boxu, kuličky jsou zde pro lepší odhad rychlosti

6.3 Časový průběh při výkonu odporu 5W

Při této simulaci byl kladen důraz na co největší shodnost podmínek s reálným měřením. Teploty v modelu byly vyhodnocovány ve stejných bodech, jako při reálném měření. Teplota okolí byla v rámci možností laboratoře také shodná se simulací. Výsledek je zachycen v grafu 6.



graf 6 Simulace ohřevu komory při výkonu 5W

6.4 Zhodnocení simulace

Program ANSYS je velice užitečný nástroj, není však kvůli jeho univerzálnosti lehké s ním pracovat a je značně náročný na výkon počítače. I na moderním počítači výpočty značně trvají a je třeba volit kompromis mezi přesností výpočtu a časem potřebným k simulaci.

Všechny výše vyhodnocené výsledky jsou platné v čase **46 min**. Je to z důvodu lepší názornosti při rozložení teploty. Na Obr. 13 a Obr. 14 jsou zachyceny řezy v rovinách. Je vidět přechod od nejteplejšího místa, tedy chladiče, až po okraj boxu, kde je teplota nejnižší. Hodnoty teplot jsou uvedeny v příložených legendách. Z Obr. 16 je jasné, že v čase 46 minut ještě teplo neprochází skrz polystyrén a tudíž se box nadále vyhřívá.

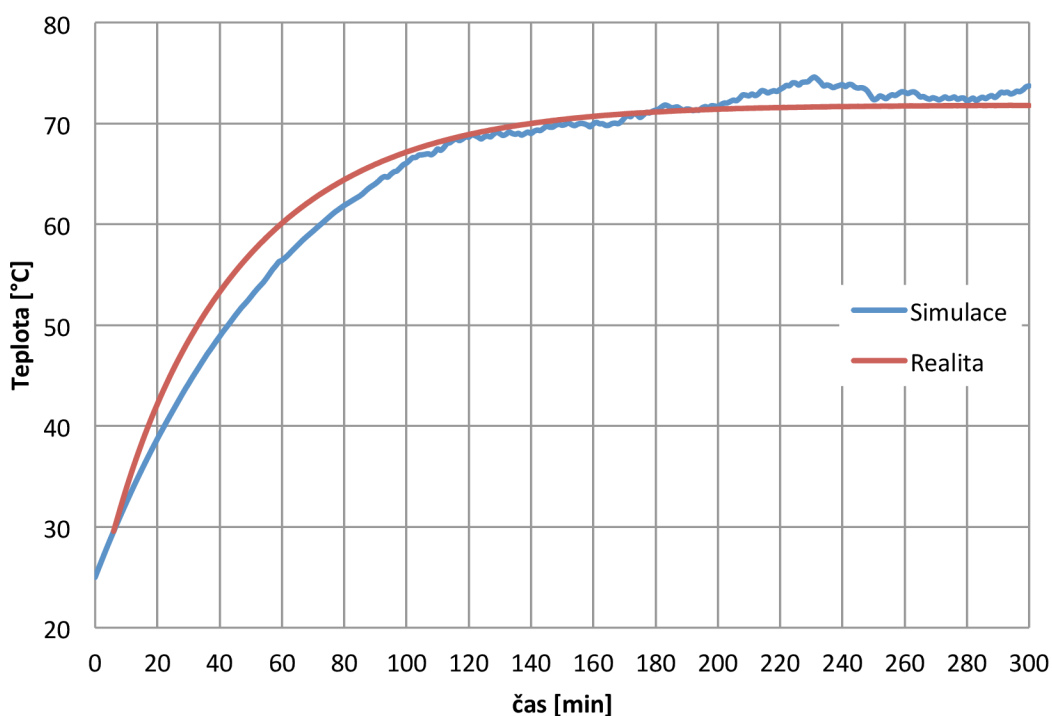
V Obr. 16 je ukázáno, kudy teplo nejvíce uniká, tedy stropem a částečně hned pod chladičem.

Na Obr. 17 a Obr. 18 je zachycena rychlost proudění, která je uvedena v legendě. Není to tedy již teplota! Obr. 17 dokazuje, že chladič „nasává“ studený vzduch ze spodní části boxu a jak se vzduch ohřívá, tak stoupá vzhůru. Nahoře narazí na strop a způsobí to vír. Také je patrné, že celkově se rychleji mění vzduch před chladičem než za ním. V Obr. 18 je zobrazeno více proudů, a také vybrané body na proudnicích, pro lepší představu rozložení rychlosti v celém boxu. Je zřejmé, že u stěn vzduch skoro stojí, naopak nad chladičem dosahuje největší rychlosti. Řešením pro rovnoměrnější proudění je použit ventilátor.

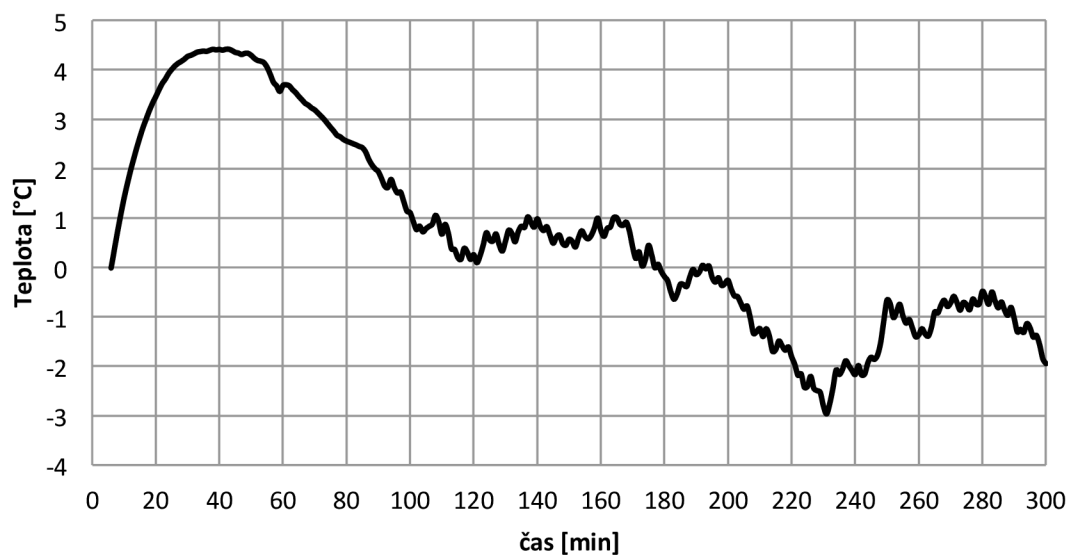
7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE A REÁLNÉHO MĚŘENÍ

Při porovnávání výsledků se zaměřím na porovnání jednotlivých bodů, v kterých byla odměřena teplota. Bude to tedy teplota měřená na chladiči, u stropu a u dna termoboxu. Dále vykreslím graf odchylky. Budu brát teplotu v simulaci za ideální a zkoumat o kolik se liší oproti reálnému řešení, tzn. odečtu reálnou hodnotu od simulované hodnoty a dostanu graf, z kterého budu moci určit největší odchylku.

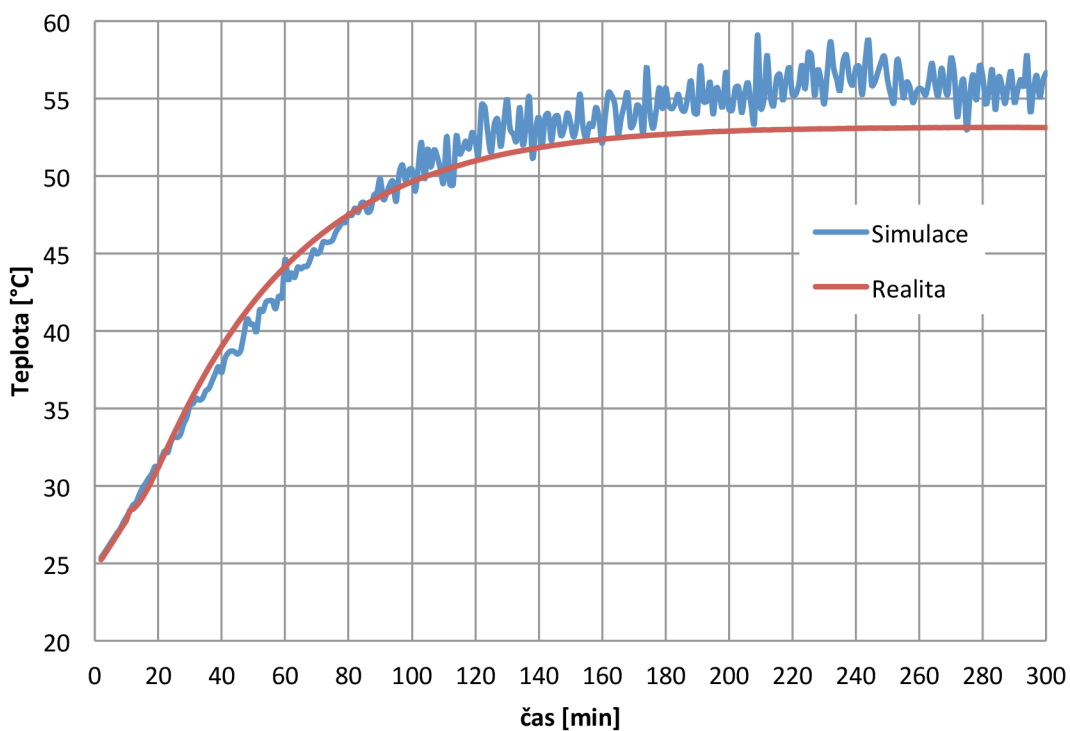
Grafy nejsou prokládané a křivka je průnikem skutečných hodnot. Při porovnávání se skutečným měřením je brána stejná hodnota výkonu, tj. 5W.



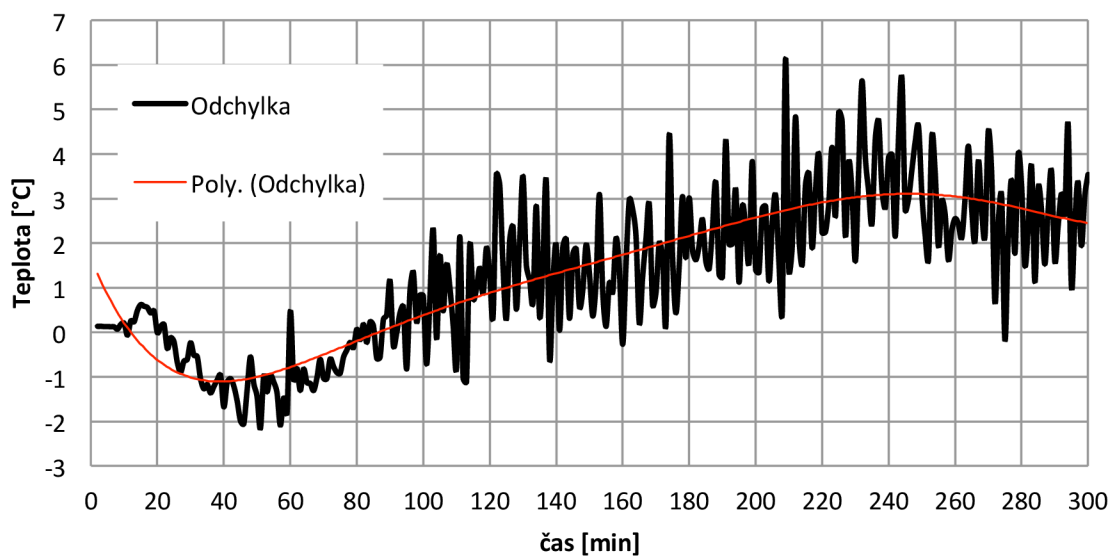
graf 7 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny na chladiči



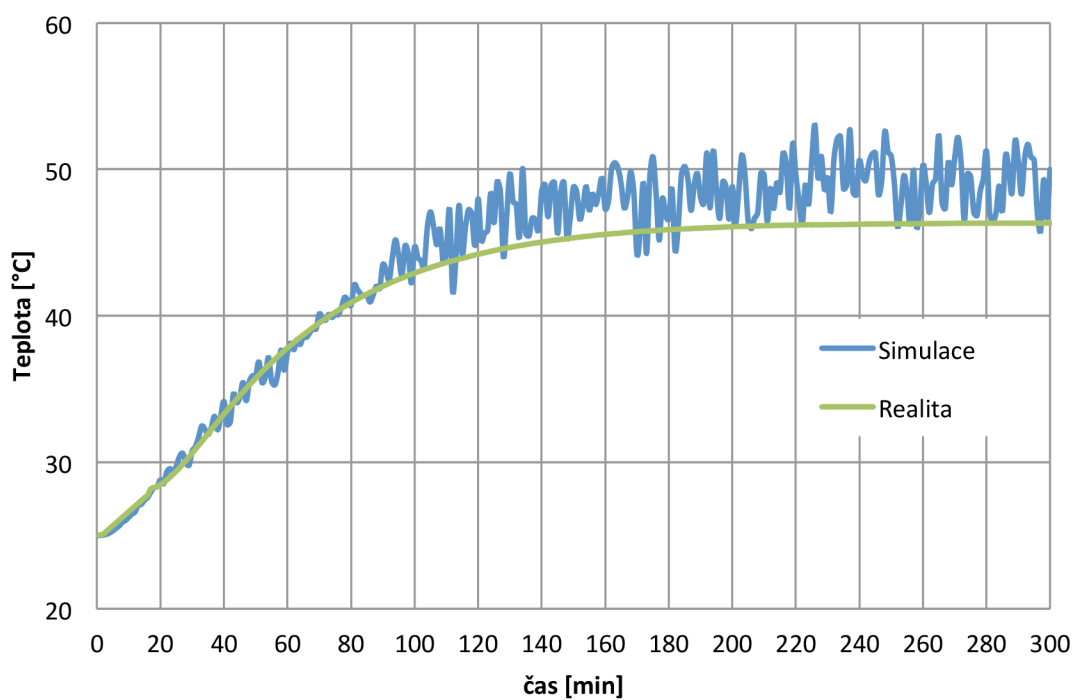
graf 8 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny na chladiči



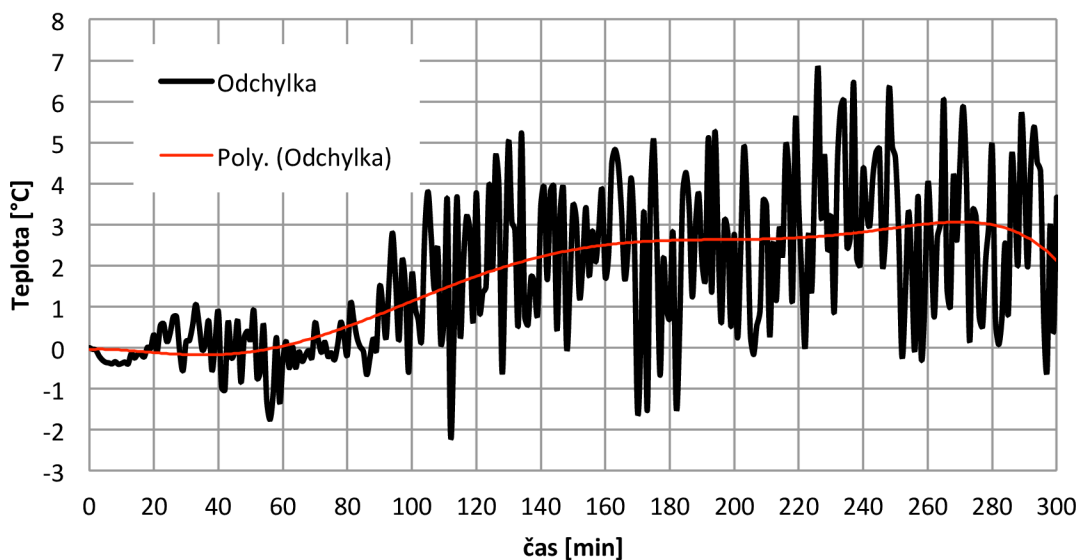
graf 9 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny u stropu boxu



graf 10 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny u stropu boxu



graf 11 Porovnání měření a simulace, teploty měřeny u dna boxu

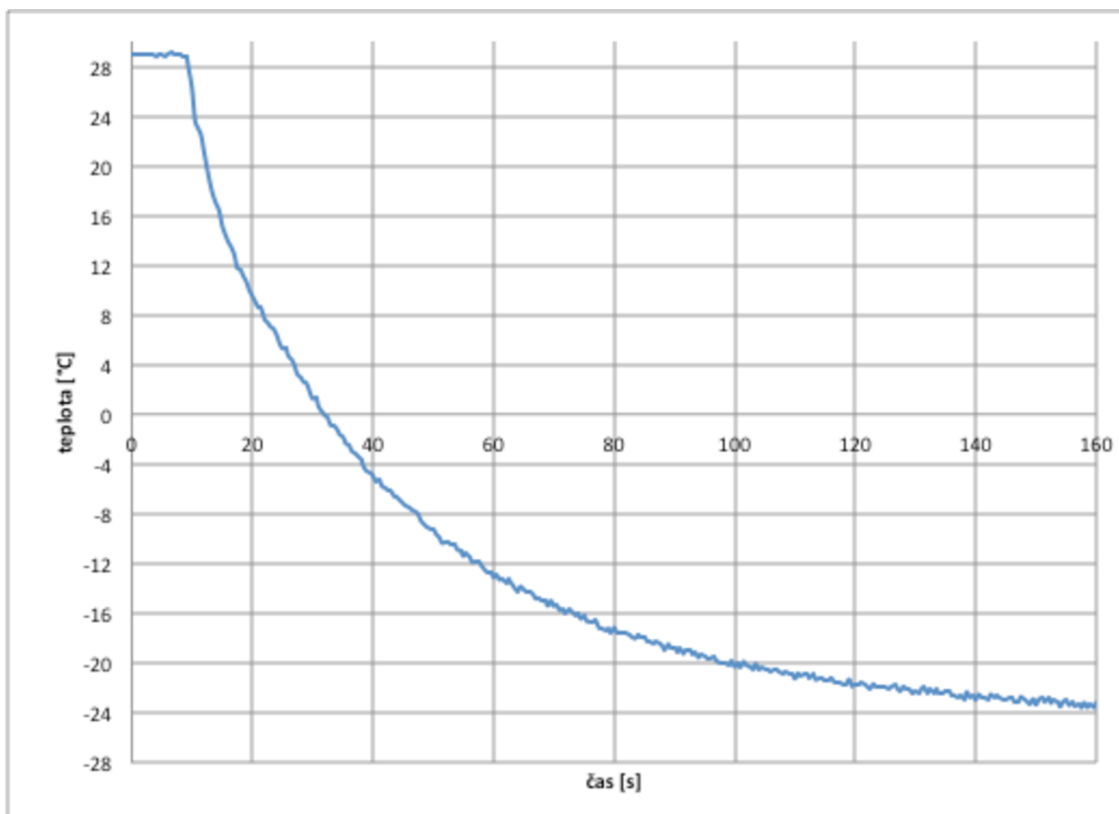


graf 12 Odchylka teploty měření od simulace, teploty měřeny u dna boxu

7.1 Zhodnocení odlišnosti simulace a reálného měření

Po celkovém pohledu na graf 7, 9 a graf 11 se zdá reálné měření jako ideální. U simulace je vidět veliký šum. Po důkladnějším zkoumání jsem dospěl k závěru, že šum může být způsoben právě laminárním prouděním v termoboxu. Správně se laminární ani za proudění neuvažuje a Workbench nabízí různá jiná proudění (k-Epsilon, Shear Stress Transport, BSL Reynolds Stress, SSG Reynolds Stress), s nimi je však šum ještě větší. A proč to nevzniká při reálném měření? Odporové čidlo teploty PT100 je zapuštěno v keramické jímce, ta působí jako kondenzátor, má jistou setrvačnost. Tuhle setrvačnost jsem při simulaci zanedbal. Pro jistotu jsem ještě odměřil skokovou změnu teploty PT100, abych svoje tvrzení potvrdil v graf 13. Zpoždění PT100 je 40 s (63% ze změny teploty).

Z grafů odchylek graf 8graf 10graf 12 je vidět, že průměrně se teploty od sebe odchýlí do 3°C. Pokud se teplota liší do 5°C oproti reálnému měření, jde o dobrý výsledek. Simulace se tedy podařila nad očekávání.



graf 13 Skoková změna teploty čidla PT100 (keramická jímka)

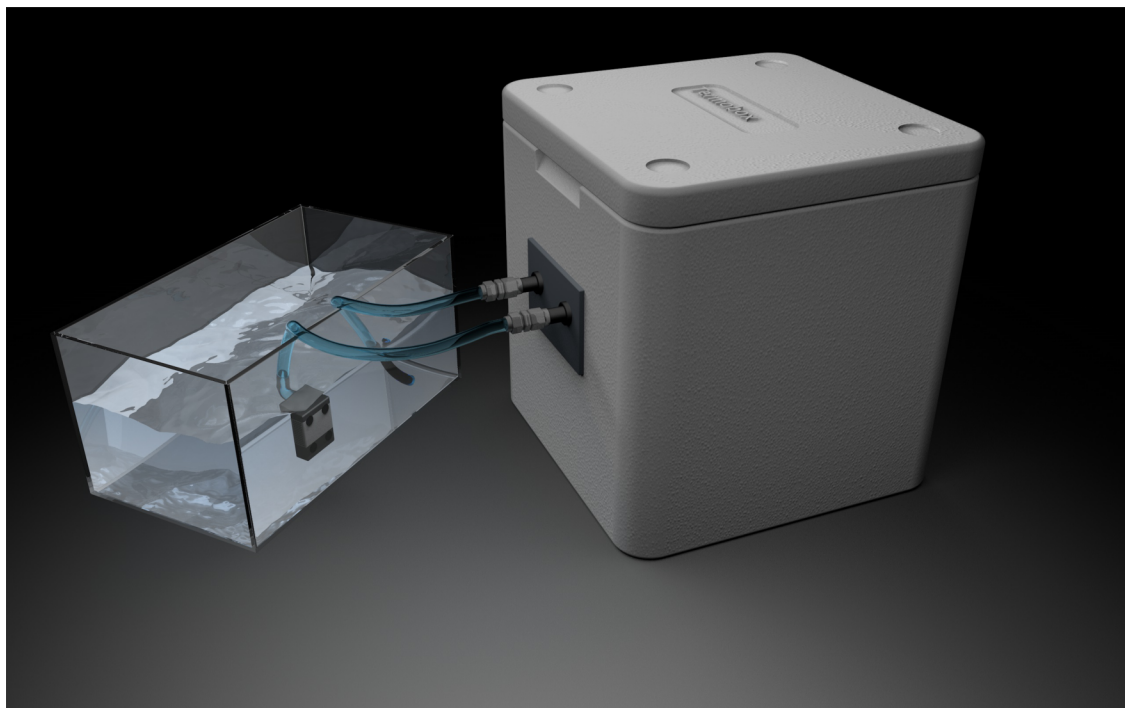
8 KONSTRUKCE SKUTEČNÉHO ŘEŠENÍ S PELTIEROVÝMI ČLÁNKY [3] [4]

8.1 Teoretický návrh

Po odměření všech charakteristik, by měl být box osazen Peltierovými články. Ze zkušeností při měření jsem zvolil dva kusy článků TEC1-12710 [24]. Rozměr článku je 40 x 40 mm a dosahuje výkonu 96W při 50°C na horké straně. Ostatní technické informace jsou uvedeny v Tabulka 3.

Tabulka 3 Výkonová specifikace Peltierových článků

Hot Side Temperature (°C)	25° C	50° C
Qmax (Watts)	85	96
Delta Tmax (°C)	66	75
I _{max} (Amps)	10.5	10.5
V _{max} (Volts)	15.2	17.4
Module Resistance (Ohms)	1.08	1.24

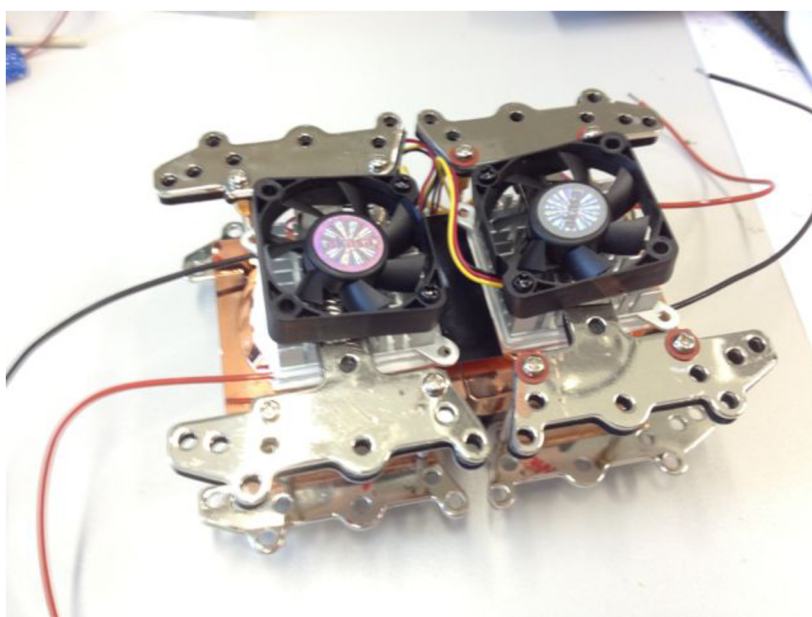


Obr. 19 Možná finální podoba konceptu termoboxu včetně chlazení [Cinema 4D]

Jako chlazení je možné zvolit buď vzduchové, nebo vodní. Nejvhodnější způsob pro tuto aplikaci, je vodní chlazení. Oproti vzduchovému se dá teplá strana spolehlivě uchladiť na nižší teplotu. Jako výměník poslouží akvárium. Vodu do oběhu bude čerpat akvarijní čerpadlo. Na Obr. 19 je znázorněný 3D model možné finální podoby termoboxu, včetně chlazení a výměníku s vodou (akvárium).

8.2 Praktická konstrukce

Nejprve jsem zkonstruoval blok s články, který je na Obr. 20. Způsob umístění Peltierových článků jsem zvolil vedle sebe a na ně jsem přidělal bloky pro vodní chlazení. Na stranu, která míří dovnitř termoboxu, jsem přidělal ventilátory pro rychlejší výměnu vzduchu a rychlejší přechodný děj.



Obr. 20 Blok se dvěma Peltierovými články připraven k osazení

Vznikl však zde problém při osazování z důvodu křehkosti polystyrénu, který celý blok článků neudržel. Řešením bylo umístit box do ještě jednoho, většího boxu. Prostor mezi boxy se vyplnil izolační pur pěnou. Získal jsem tedy pevnější konstrukci, lepší izolační vlastnosti, ale větší rozměry. Vše bylo zastříkáno a utěsněno pur pěnou. Víko se dá otevřít.



Obr. 21 Konstrukce komory - štříkání pur pěnou

Při volbě čerpadla bylo potřeba zajistit dostatečnou rychlost průtoku, aby nevytékala voda o moc teplejší než teplota vody v akváriu. Experimentálně bylo zjištěno, že je nutný průtok alespoň 500l/h.



Obr. 22 Hotové řešení termoboxu včetně výměníku s chlazením

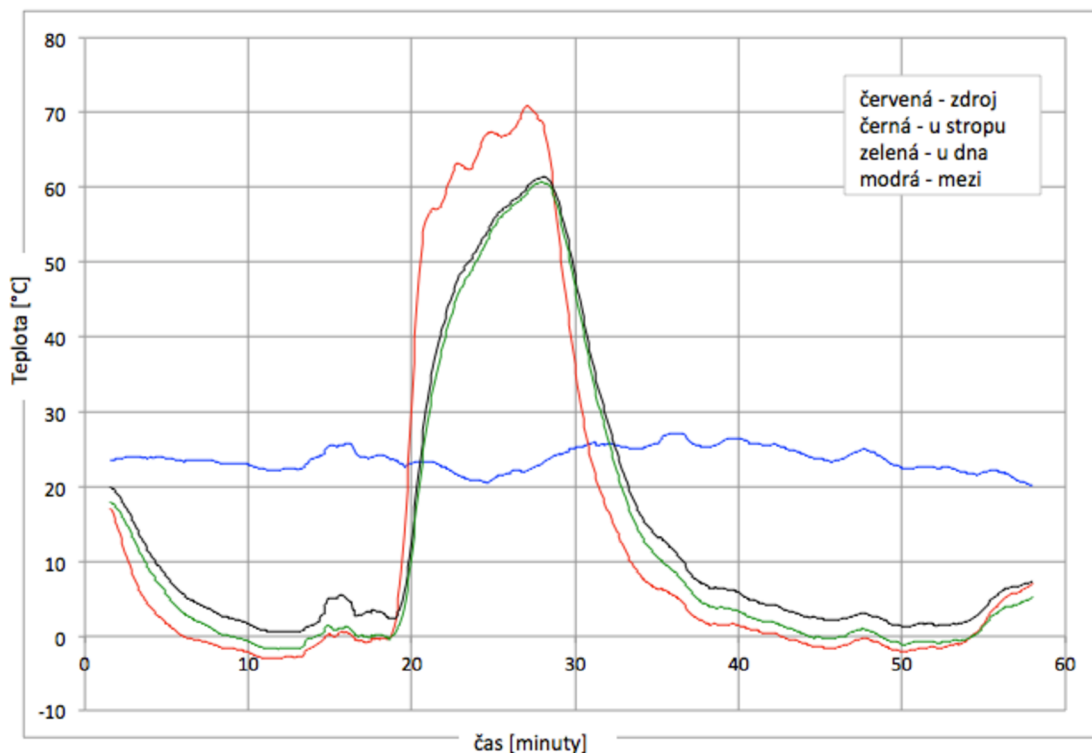
8.3 Měření na reálném boxu

Testovací komoru jsem proměřil, abych především zjistil její teplotní rozsah. Výsledek měření je v graf 14. Červená čára je charakteristika teplotního čidla, umístěného přímo na výfuku ventilátorů z chladičů. Černá je pak teplota na stěně u

stropu boxu a červená je na dně boxu. Modrá křivka znázorňuje změnu teploty mezi boxy, tedy v pur pění.

Z grafu je vidět, že požadované teploty 10°C se dá dosáhnout po 2 minutách z pokojové teploty 20°C, z teploty 60°C se pak dosáhne 10°C za 8 minut. Komora tedy splňuje zadání a dá se vychladit na 10°C a vyhřát na 60°C. Pro zajímavost nejnižší dosažitelná teplota je 0 °C při pokojové teplotě 25°C a nejvyšší teplota je omezena teplotou tání polystyrénu, tedy 70°C.

Pro měření, nezávislé na teplotě, jsem použil láhev s ledem ponořenou do vody. Ta spolehlivě udrží vodu na konstantní teplotě 20°C. Taky bylo zjištěno, že Peltierovy články dokáží snížit teplotu v komoře asi o 20°C oproti teplotě vody. Proto by voda neměla dosáhnout více jak 30°C, neboť by nemohlo být zaručeno dosažení teploty 10°C.



graf 14 Závislost teploty na čase reálného a konečného termoboxu

9 PRINCIP NÁVRHU REGULACE

Další část práce se zabývá způsobem, jakým se dá v komoře udržet teplota na konstantní hodnotě. Jelikož v zadání není určena přesnost regulace, stanovím si cíl, kdy požaduji konstantní teplotu s odchylkou maximálně 2°C od žádané hodnoty.

Pro možnost regulace teploty pomocí PC je nutné navrhnout řídicí elektroniku, která bude realizovat ovládání teploty v komoře. Z požadavků je jasné využití mikroprocesoru, převodníku USB na UART a návrh výkonové části, která by dokázala regulovat napětí a polaritu na Peltierových článcích.

Jsou zde dvě možnosti ovládaní napětí na člancích. Použití relé nebo návrh z pasivních součástek. Vzhledem k rychlosti přepínání při regulaci jsem zvolil pasivní součástky. Princip jsem využil z regulace modelářských elektromotorů. Používá se zde H-Můstek, což je zapojení čtyř MOSFETů. Velikou výhodou je právě změna polarity a skoro žádné zahřívání při řízení pomocí PWM. MOSFETy mají v otevřeném stavu jen velmi malý odpor, v řádech setin ohmů, a proto se nezahřívají.

10 ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA

Budu se zde zabývat vhodným výběrem čidel, návrhem schémat a plošných spojů pro elektroniku. Nakonec i mechanickým zpracováním a umístěním do vhodné krabičky.

10.1 Výběr teplotních čidel

Díky simulacím prováděným v programu ANSYS jsem zjistil rozložení teplot v komoře a zjistil jsem nutnost použití alespoň dvou teplotních čidel. Jedno se umístí přímo na chladič v komoře a budeme moci měřit okamžitou teplotu vzduchu, který bude rozehnán ventilátory po komoře. Druhé teplotní čidlo umístím do protilehlého středu komory.

10.1.1 Testy

V úvahu jsem vzal použití digitálního čidla s ADT7410 [28] od firmy Analog Devices s I2C komunikací a přesností $0,25^{\circ}\text{C}$ bez nutnosti kalibrace a analogové čidlo PT1000 [17] s přesností 0,1%.

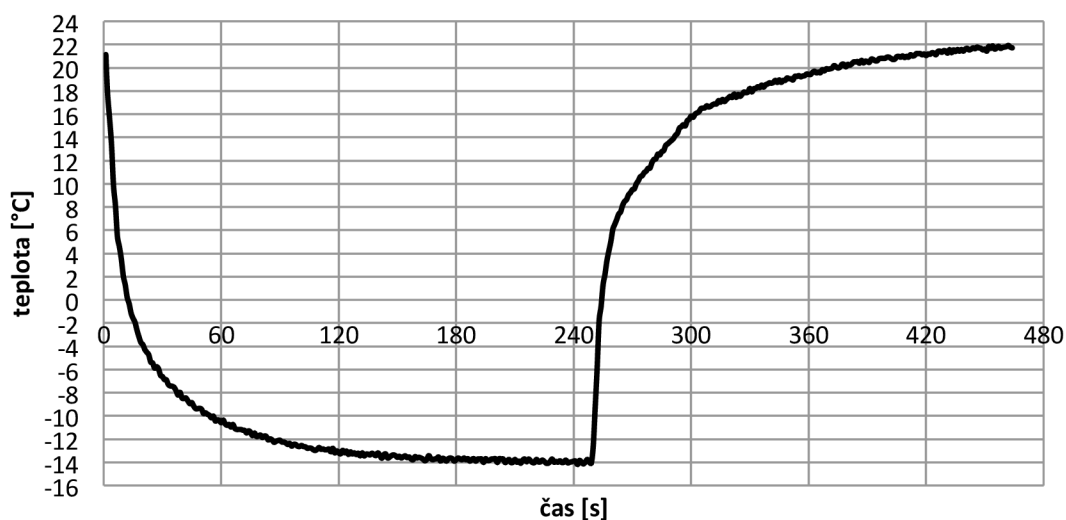
Pro výběr vhodného čidla je důležitým faktorem nejen přesnost, ale i rychlost odezvy. Odměřil jsem tedy rychlost reakce čidla na skokovou změnu teploty. Čidlo jsem vložil do mrazáku a sledoval rychlost klesání teploty.

ADT7410 Skok teploty



graf 15 Odezva na skok teploty ADT7410

PT1000 Skok teploty



graf 16 Odezva na skok teploty PT1000

Z graf 15 a graf 16 je vidět, že odporové čidlo PT1000 je rychlejší než ADT7410. I když výrobci časové konstanty čidel uvádějí, nebyly u obou čidel zdokumentovány stejně. Odměřil jsem si tedy vlastní, na konkrétní aplikaci.

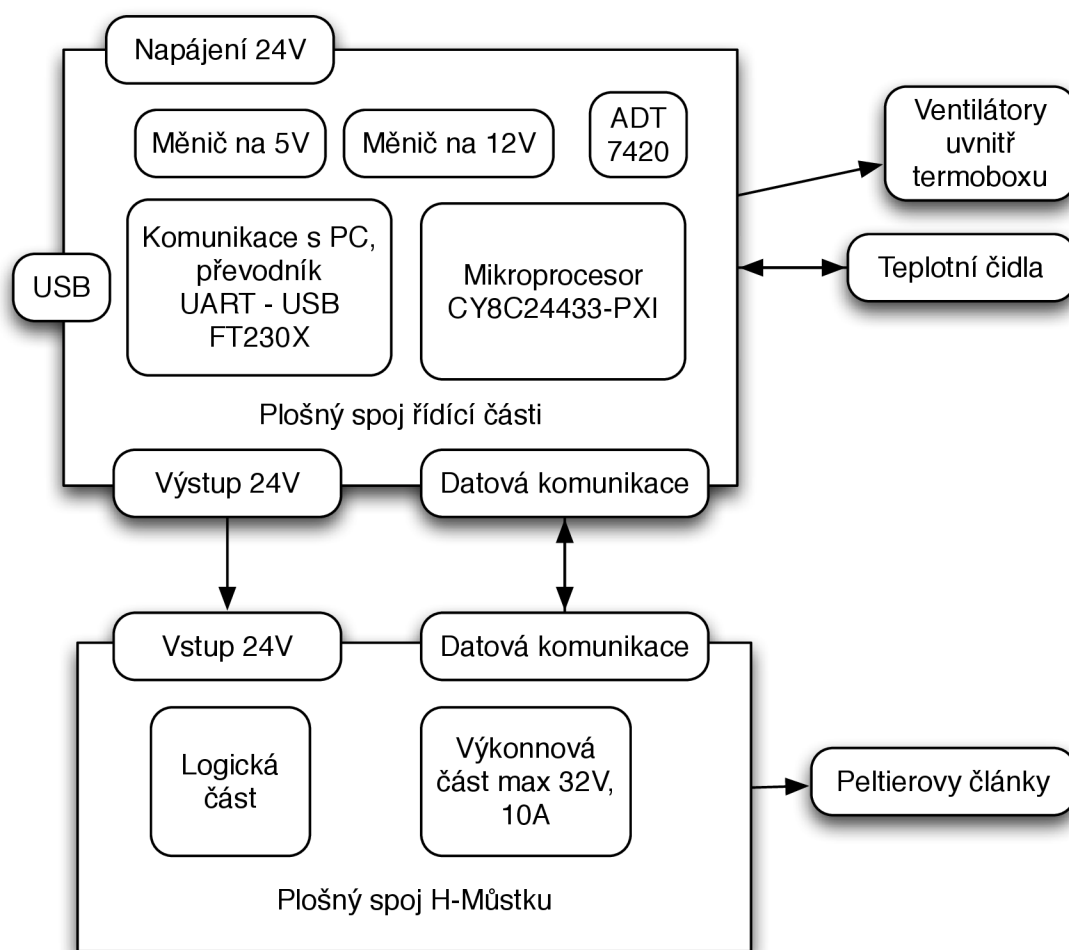
10.1.2 Výsledek testu

PT1000 dosáhla 63% ustálené hodnoty za 14 s, zatímco ADT7410 až po 120 s. I když nebylo dodrženo úplně stejných teplotních podmínek pro obě čidla, je PT1000 jasně rychlejší a vhodné pro regulaci. Pomalejší odezva ADT7410 je především dána větší velikostí pouzdra.

Jelikož analogová čidla nemusí být tak přesná, je v zapojení použito i čidlo ADT7410, které měří teplotu okolí a můžeme se díky němu před měřením přesvědčit o správnosti údajů poskytovaných z PT1000.

10.2 Návrh a realizace elektronických zapojení

Elektroniku jsem rozdělil na 2 desky. Jednu s řídicí elektronikou a druhou desku s H-Můstkem. Celková koncepce je zakreslena v Obr. 23. Jsou zde zakresleny i externí periferie. Napájení celého systému je v rozsahu 24-32V. Nejlepší výsledky pak získáme při 30V.



Obr. 23 Schéma rozdělení desek plošných spojů a připojených periférií

10.2.1 H-Můstek [11]

Při návrhu jsem vycházel z obecně známých zapojení [10] a z principu činnosti MOSFETů. Dále je před můstkem logický obvod zajišťující minimalizaci přívodních kabelů a hlavně brání zkratu, který by zde mohl nastat při nesprávném sepnutí.

10.2.1.1 Logika

Při návrhu jsem si dal požadavek připojení pouze dvou logických vodičů. Napájení ON/OFF a změna polaroty. Můstek musí být vhodný i pro řízení pomocí PWM. V principu je tedy vždy spodní MOSFET otevřen/uzavřen a horní se otevírá a uzavírá. Následně jsem sestavil pravdivostní tabulku a provedl minimalizaci a realizaci pomocí hradel NOR.

10.2.1.2 Spínání

Pro tuto část jsem použil dvojici P-MOSFETů do horní části můstku a dvojici N-MOSFETů do dolní části můstku.

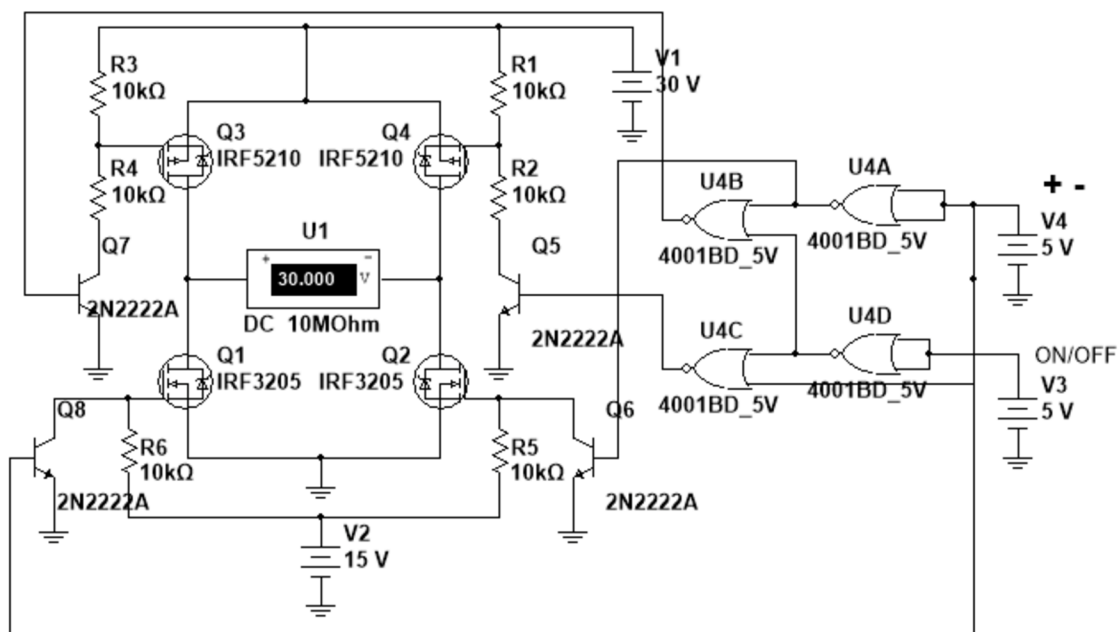
P-MOSFET je typu IRF4905 [25]. Snese maximální napětí $V_{DSS} = -55V$ a proud $I_D = -74A$. Jeho odpor $R_{DS(ON)}=0,2 \Omega$, což znamená výkonovou ztrátu pouze 2W. N-MOSFET je typu IRF3205 [26]. Snese maximální napětí $V_{DSS} = 55V$ a proud $I_D = 110A$. Jeho odpor $R_{DS(ON)}=8 m\Omega$, což znamená výkonovou ztrátu pouze 0,8W.

K chlazení jsem tedy použil menší žebrované chladiče černé barvy o rozměrech 20x20x15 mm.

Jelikož spínací napětí MOSFETů, je vyšší než 5 V, musel jsem zvýšit výstupní napětí z logiky. Maximální možné spínací napětí MOSFETů je $U_{GS}=20V$. Náš můstek je napájen 30V, řeším tedy snížení napětí na polovinu odporovým můstkem pro horní část a stabilizátorem 7815 [27] pro spodní část.

10.2.1.3 Simulace

Funkčnost navrženého obvodu jsem ověřil v Multisimu. V reálném zapojení jsem tranzistory nahradil integrovaným obvodem ULN2001, který nahradí nejen tranzistory, ale i předradné odpory, které jsou v reálné zapojení vyžadovány.

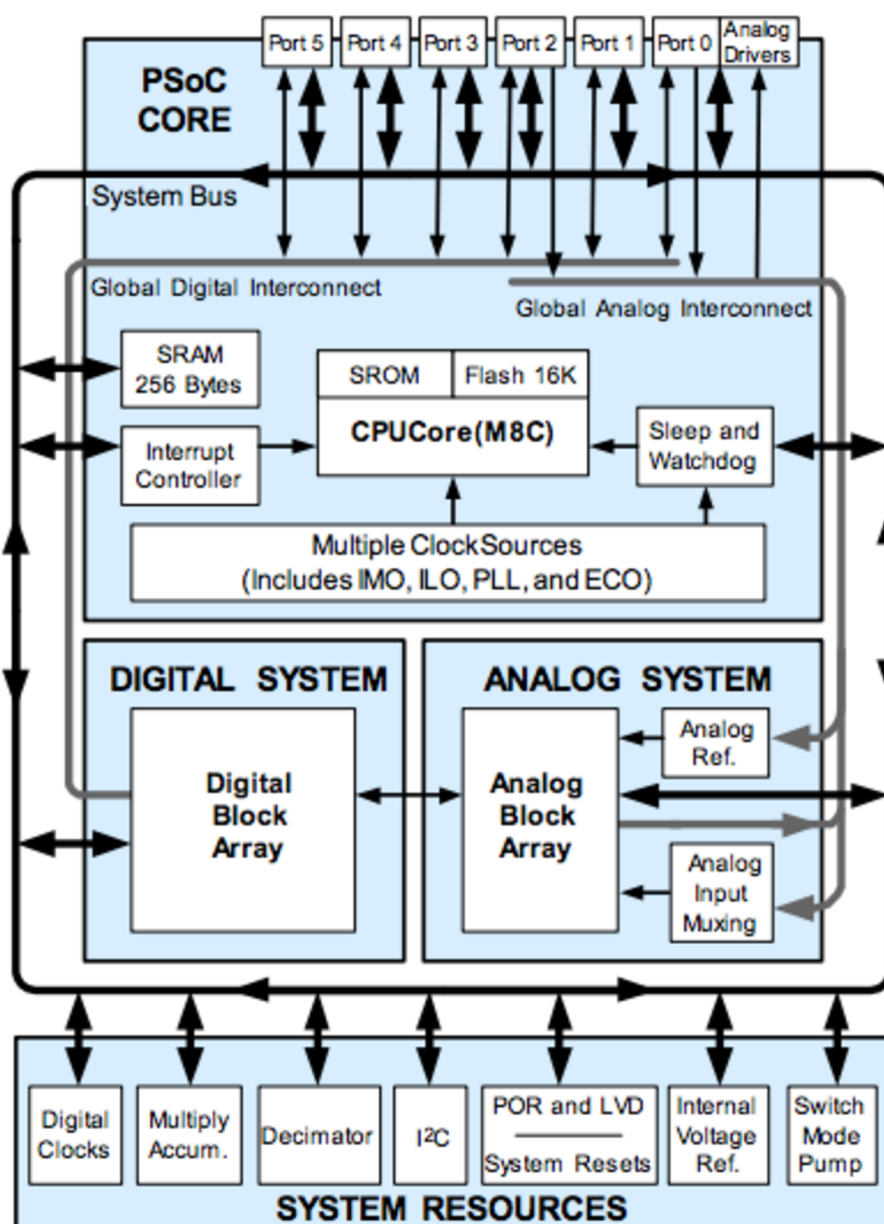


Obr. 24 Schéma zapojení H-Můstku v Multisimu

10.2.1.4 Návrh plošného spoje

Cesty výkonové části byly značně zesíleny oproti logickým a při pájení prolité cínem, aby je zbytečně neohříval proud tekoucí po nich. Logická a analogová zem je spojena v jednom bodě, kvůli minimalizaci rušení. Celkově je jednostranná deska naddimenzována a zvládne i krátkodobější zkrat při plném výkonu 10A. Pokud by byl zdroj výkonnější, zareaguje pojistka. Schéma zapojení a plošný spoj je uveden v příloze.

10.2.2 Řídicí elektronika



Obr. 25 Blokové schéma mikroprocesoru [13]

Klíčovým prvkem je zde výběr mikroprocesoru a převodníku USB na UART. Jako převodním jsem použil FT230X [12]. Jde o jeden z novějších kousků od firmy FTDI Chip. Vyniká svou cenou (40 Kč), jednoduchým zapojením, funkčností a kompatibilitou s několika operačními systémy.

Jako mikroprocesor byl vybrán typ CY8C27443-PXI [13] od firmy Cypress. Předností toho mikroprocesoru je jednoduchost připojení čidla PT1000 s využitím pouze jednoho externího referenčního odporu na integrovaný 14-bit AD převodník. HW podpora I2C komunikace. Jednoduchost programování pomocí již přednastavených bloků funkcí, ulehčující programování. To je v možné v jazyku C i Assembleru.

10.2.2.1 Obvodové zapojení

Jelikož bude napájení řešeno z univerzálního stabilizovaného zdroje, hrozí zde nebezpečí přepólování (připojení přes banánky) zdroje a následné přepólování by bylo pro obvod zničující. Přidal jsem tedy ochranou diodu, která zareaguje při přepólování.

Dále je zde regulátor na 12 V pro napájení ventilátorů v termoboxu a na 5 V pro mikroprocesor a logiku. V logické části se nešetřilo blokovacími kondenzátory pro zaručení nejvyšší spolehlivosti. Na vstupu z USB je ochranná součástka Polyswitch, která zaručí, že odběr z USB nepřesáhne 200 mA. Díky tomu je logická část schopna fungovat i bez externího zdroje, pokud nepotřebujeme využívat výkon H-Můstku. Hodí se to například při programování a demonstraci samotného programu v PC.

Signály RX a TX jsou na desce přerušeny a musí se pomocí jumperů přemostit. Je to z důvodu zprovoznění přístroje a hledání případných chyb při komunikaci. Z mikroprocesoru je vyvedena kontrolní LED, která bliká při správné funkci mikroprocesoru.

10.2.2.2 Návrh plošného spoje

Blokovací kondenzátory byly připojeny dle zásad co nejbliže k napájecím svorkám. Analogová a logická zem se spojují v jednom bodě. Deska je jednostranná s vylitou zemí. Schéma zapojení a plošný spoj je uveden v příloze A1, A4, A5, A6.

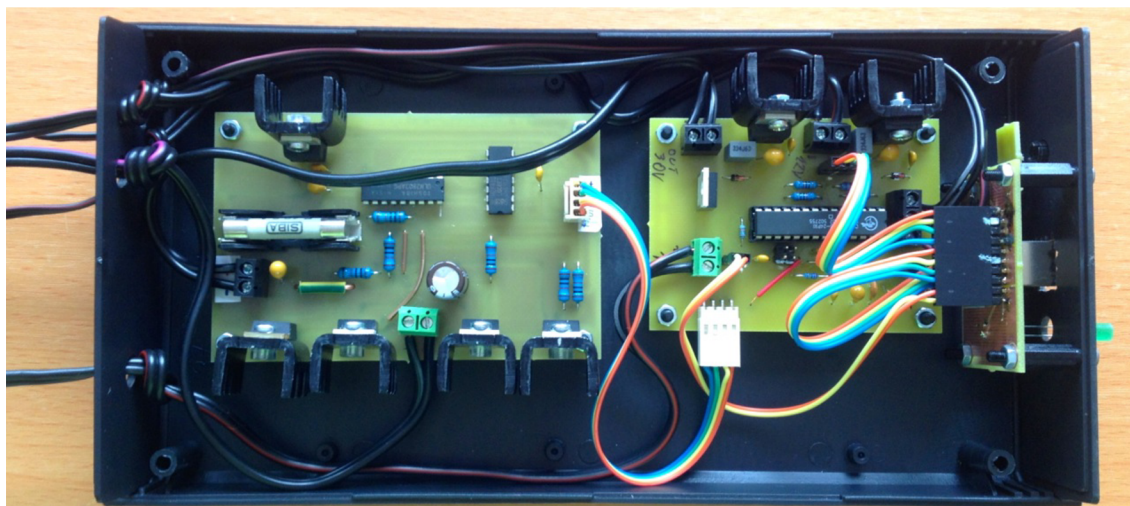
10.2.2.3 Připojení k PC

Připojení je řešeno přes USB, které je na samostatném plošném spoji, který je přidělán přes distanční sloupky na čelo krabičky. Je zde i kontrolní LED a digitální teplotní čidlo ADT7410, aby teplotu okolí příliš nezkreslovala teplota v krabičce. Schéma zapojení a plošný spoj je uveden v příloze A3, A9, A10, A11.

10.2.3 Umístění do krabičky a popis

Plošné spoje byly umístěny do černé plastové krabičky U-KP28 o vnějších rozměrech 49 x 127 x 257 mm (V x Š x H). Na čele je USB, kontrolní LED a otvor pro

digitální teplotní čidlo. Ze zadní strany je vyveden kabel pro napájení zařízení a kabel pro připojení k termoboxu. Pro reálnější představu uspořádání elektroniky v krabičce je přiložen Obr. 26.



Obr. 26 Reálné uspořádání elektroniky v krabičce

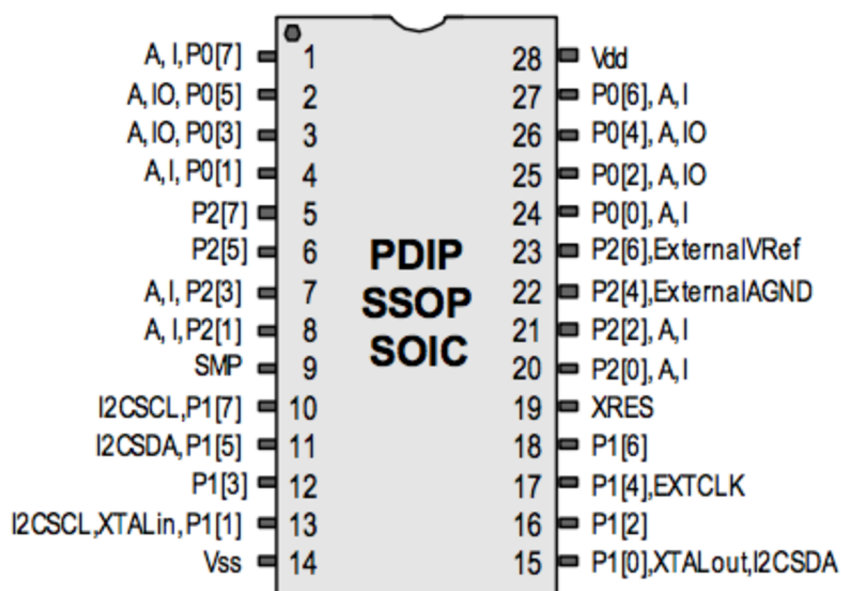
11 TVORBA SOFTWARE

Nejprve bylo nutné naprogramovat mikroprocesor, následně jsem ověřil jeho funkčnost v některém terminálovém programu, kterým je například CoolTerm. Poté jsem začal programovat obslužnou aplikaci pro PC.

11.1 Program pro mikroprocesor

Mikroprocesor CY8C27443-PXI [13] od firmy Cypress jsem programoval ve vývojovém prostředí PSoC Designer 5.2, který dodává výrobce.

CY8C27443 28-Pin PSoC Device



Obr. 27 Označení pinů mikroprocesoru CY8C27443 [13]

Jde o velmi přehledné vývojové prostředí. Nabízí možnost programování v Assembleru a v jazyku C. Já jsem si zvolil jazyk C. PSoC Designer nabízí spoustu přednastavených bloků s hotovými funkcemi. V mikroprocesoru jsem poté zprovoznil 4 zásadní funkce:

- I2C sběrnici pro komunikaci s digitálním teplotním senzorem ADT7410
- UART komunikaci s PC
- AD převodník s multiplexováním pro 2 teplotní čidla PT1000
- Ovládání jednotlivých pinů bez nutnosti maskování

Struktura samotného programu poté vypadala následovně. Vše jsem naprogramoval do jednotlivých funkcí, které následně volám v hlavní části programu `main`.

`Main` je možné rozdělit na 2 části. V první je kompletní inicializace všech nastavení a v druhé části běží smyčka `while`, která postupně volá funkce, čte a tiskne hodnoty. Následně nastíním hlavní body při programování:

11.1.1 Princip tisku na UART

Komunikace běží na rychlosti 9600 baudů, po 8 datových bitech, bez parity s jedním stop bitem. Na mikroprocesoru se nachází na vývodech P[2]2 (Tx) a P[2]1 (Rx). Samotný tisk provádí funkce `UART_PutSHexInt(hodnota);`. Ta odešle do počítače číslo v hexa hodnotě. Pro snadnou identifikaci v PC, jsou jednotlivé hodnoty v předdefinovaném pořadí za sebou a jsou vždy odděleny tabulátorem ("`\t`"). Po vytisknutí všech hodnot následuje tisk znaky konce řádku ("`\n`").

11.1.2 Programování sensoru ADT7410

Sensor ADT7410 komunikuje s mikroprocesorem pomocí I2C sběrnice, která je hardwarově implementována do mikroprocesoru. Rychlost I2C sběrnice jsem nastavil na 50 kHz. Umístěna je na vývodech P[1]5 (SDA) a P[1]7 (SCL). Jeho adresa je `0x48`, hardwarově jsou výstupy A1 i A2 z ADT7410 spojeny na zem.

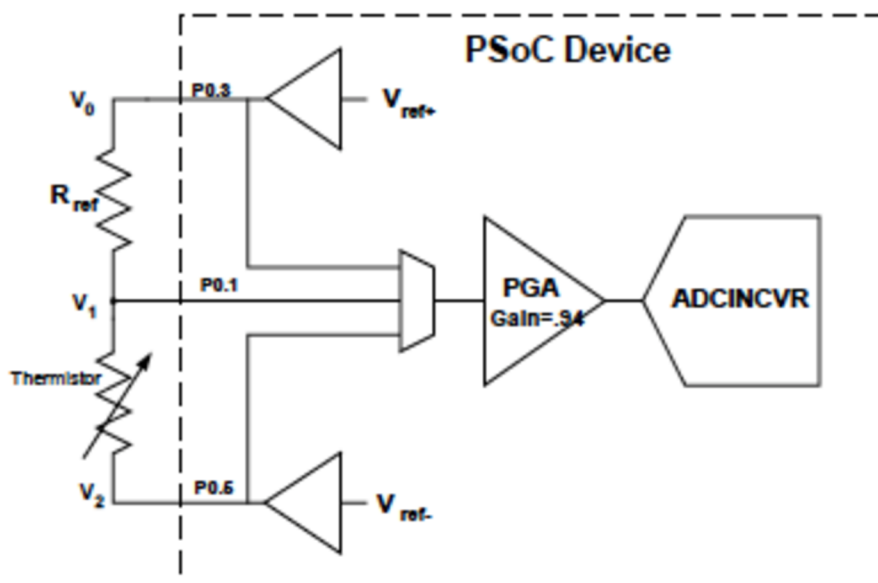
V prvním kroku je sensor inicializován, tj nastaven na 16 bit přesnost. To se provede zápisem hodnoty `0x80` do registru `0x03`. Poté již v každém kroku čtu hodnotu teploty z registru `0x00`. Hodnotu můžu číst, kdy chci, aktualizuje se však každých 240 ms, což je doba převodu. Jelikož 16 bit přesnost vyžaduje čtení ze 2 bufferů, dostanu i dvě hodnoty, ty následně spojím do jedné 16 bitové a vytisknu na UART.

11.1.3 Čtení hodnoty čidel PT1000

Při rozhodování se mezi 2 a 4 vodičovou metodou měření, jsem nakonec kvůli úspoře pinů a množství vodičů zvolil 2-vodičové měření. Vzhledem k délce a relativně malé změně teploty vůči změně odporu drátu se změna měřeného odporu projeví jen zanedbatelně, jelikož PT1000 i referenční odpor mají chybu 0,1% což je asi 1 ohm. Vzhledem ke konstantní délce drátu chybu dále minimalizuji v PC pomocí odečtení odporu vedení, které jsem naměřil 1 ohm, při zkratování čidla PT1000.

Princip čtení teploty spočívá v odměření napětí na svorkách PT1000 a jednoho referenčního odporu. Proto jako první jsem nastavil hodnoty referenčních napětí na nízkou a vysokou hodnotu. Poté pomocí multiplexování postupně přepínám mezi piny a měřím hodnotu napětí pomocí integračního AD převodníku [19]. Ten je 14-bit, vzorkovací frekvence je 1MHz a převod jedné hodnoty trvá asi 17 ms. To odesílám na

UART a v PC dále zpracovávám. Detaily metody měření jsou vysvětleny v literatuře [14] a na Obr. 28. Způsob zapojení AD převodníku a multiplexeru v literatuře [18].



Obr. 28 Princip měření teploty mikroprocesorem z PT1000 [14]

Hodnotu z čidel nijak neprůměruji a odesílám okamžitě na výstup. Chyba měření je zde zanedbatelná oproti přesnosti regulace. Navíc při prudkém ohřevu se teplota na čidle mění velmi rychle a průměrování by mohlo zkreslovat výsledek.

Pro měření byl použit port 0, kde na P[0]3 je vysoká hodnota referenčního napětí, na P[0]5 je nízká hodnota referenčního napětí, na P[0]1 je zapojeno jedno čidlo PT1000 a na P[0]7 je zapojeno druhé čidlo PT1000.

11.1.4 Doplnky

Jako doplněk bych označil signalizační LED na řídicí krabičce, která nás informuje o správné funkčnosti zařízení. Je nastavena, že s každým cyklem invertuje svoji logickou úroveň. Výsledkem je blikající led s periodou asi 0,5 sekundy. LED je zapojena na pin P[1]2.

Druhým doplňkem je časovač, který nám právě upraví cykly mikroprocesoru. Po vykonání jedné série všech příkazů, mikroprocesor počká 500 ms, než začne ve smyčce while opět příkazy vykonávat. Tím je dána délka jednoho cyklu, který je zde zmiňován. Vykonávání ostatních příkazů, je tak rychlé, že by se dalo teoreticky časově zanedbat. 500 ms bylo vybráno právě kvůli době převodu ADT7410, abych zbytečně nezahlcovat USB sběrnici a následně ulehčil programu od množství zpracovávaných hodnot.

11.1.5 Zpracování hodnot z PC [15] [16]

Příchozí komunikaci řeším jako postupnou kombinaci tří čísel, z kterých se určí stav H-Můstku. Tvar čísla může vypadat následovně: „8 1 0“, kdy první číslice znamená něco jako kód komunikace, pokud by číslo bylo jiné než 8, na zbytku čísel nezáleží a H-Můstek nezmění stav. Další číslo znamená, jestli je zapnuté napájení, kde 0 je vypnuto a 1 je zapnuto. Poslední číslo znamená polaritu. Při 0 chladí, při 1 topí. Za číslem musí být následně znak ukončení řádku. Topení je napojeno na pin P[1]1 a polarita na P[1]0.

11.1.6 Ochrana při přerušené komunikaci

Díky velké vzorkovací periodě, která je asi 0,5 sekundy, jsou řešeny všechny výpočty, ovládání a regulace z PC. Proto byla do mikroprocesoru přidána ochrana proti nečekanému přerušení komunikace, ať už z důvodu zamrznutí systému nebo nechtěnému přerušení kabelu mezi PC a komunikační krabičkou. Ochrana pracuje na následujícím principu. Pokud po dobu 6 cyklů, respektive 3 sekund mikroprocesor nedostane informaci z PC o nastavení výstupů, nastaví automaticky H-Můstek na vypnutý.

11.2 Program pro PC

Program s názvem TERMOBOX jsem vytvořil v programu Microsoft Visual Studio 2010 Premium. Použil jsem programovací jazyk C#, který je pro aplikaci tohoto typu velmi vhodný. Program vyžaduje k běhu .NET Framework, který je součástí systému Windows. Program je tedy spustitelný jedině na Windows. Před prvním spuštěním programu TERMOBOX je nutné nainstalovat ovladače k USB komunikaci pro převodník FT230x [12]. Ovladače jsou přiloženy k bakalářské práci v elektronické podobě. Bezchybný chod programu byl laděn a testován na Windows 8. Program byl navrhnut tak, aby byl maximálně intuitivní i bez použití jakéhokoli návodu. Součástí je ošetření proti neočekávaným událostem, jako je nečekané přerušení komunikace nebo spuštění programu bez připojeného hardwaru.

11.2.1 Návod k ovládání programu

Pro spuštění programu budete potřebovat systém Windows s nainstalovaným .NET Framework verze 4, dodávané FTDI ovladače [12] a samotný hardware. Celý program se skládá z jediné spustitelné ikony s názvem TERMOBOX.exe a vyžaduje rozlišení alespoň 1000x600.



Obr. 29 Ikona pro spuštění programu

Po spuštění aplikace se dostanete na úvodní okno Obr. 30, kde jsou základní informace o funkci programu a tlačítko pro spuštění komunikace. V rámečku **Výběr portu**, musí být vždy vybrán ten správný port, který komunikuje s FTDI čipem. Pokud připojíte zařízení až po spuštění programu, je nutné zmáčknout tlačítko **Hledej porty** k aktualizaci připojených portů.

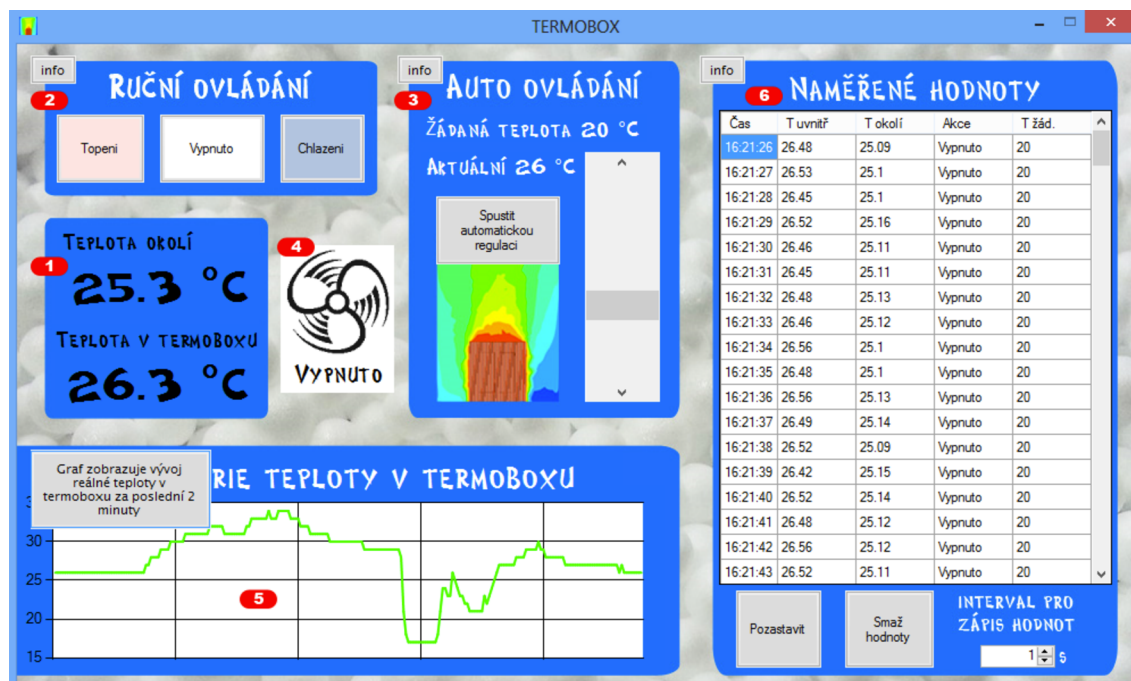


Obr. 30 Úvodní okno po spuštění programu TERMOBOX

Následně se dostáváte do hlavní ovládací části programu Obr. 31. Pro intuitivnější ovládání je okno rozděleno na 6 bloků (v obrázku označeno červenými čísly), které jsou v dokumentaci očíslovány pro lepší orientaci.

V **bloku 1** se zobrazuje teplota okolí pod ní je aktuální teplota v termoboxu. V **bloku 2** spustíte vytápění nebo ochlazování komory. Je možné dosáhnout i většího rozsahu teploty než 10 – 60 °C v závislosti na okolních podmínkách. Spodní hranici určuje především teplota vody, kdy komora je schopna se vychladit přibližně o 20 °C pod teplotu vody a horní hranici určuje teplota okolí nebo ochranné teplotní čidlo nastavené na 65 °C. Při spuštěné automatické regulace je ruční ovládání neaktivní. V **bloku 3** spustíte automatickou regulaci, která reguluje s odchylkou 1 - 2 °C od

žádané hodnoty. Při měření součástky se však předpokládá zanedbání chyby vzhledem k větší teplotní setrvačnosti, než má vzduch. Žádanou teplotu nastavíte **posuvníkem** v rozsahu 10 - 60 °C. V **bloku 4** se zobrazuje aktuální akce v komoře. Mohou nastat tři stavy a to že topí, chladí nebo je vypnuta. Pro snadnější orientaci je blok 4 podbarvován



Obr. 31 Hlavní okno programu pro ovládání teploty v Termoboxu

podobně jako tlačítka v bloku 2. V **bloku 5** je vidět informativní graf, který zobrazuje historii teploty v termoboxu za poslední 2 minuty. Změna teploty je zobrazována po 1 °C a osa s hodnotami teploty se automaticky přizpůsobuje pro zachycení co největšího detailu. V **bloku 6** jsou do tabulky postupně tištěny údaje o aktuálním času, teplotě okolí, teplotě v termoboxu, žádaná teplota a akce, jestli se aktuálně v komoře topí nebo chladí popřípadě je vypnuta. Tlačítkem **Pozastavit**, lze ukládání přerušit. Tlačítkem **Smaž hodnoty** smažete všechny hodnoty v tabulce. V políčku pro zápis intervalu hodnot lze nastavit, jak často chcete hodnoty zaznamenávat. Číslo je v sekundách a maximální doba je 1 hodina, minimální pak 1 sekunda. Interval se volí v závislosti na době měření. Naměřené hodnoty se pak dají zkopírovat do libovolného programu, nejlépe uzpůsobeného pro práci s tabulkami, jako je program Excel. Pro snadnější orientaci mezi funkcemi programu jsem přidal tlačítka **info**, které se animovaně rozbíjí a upřesní funkci daného bloku.

11.2.2 Princip programování

Popíšu zde především principy, jakými jsem danou problematiku řešil.

11.2.2.1 Nastavení komunikace

Komunikace je primárně nastavena stejně jako na mikroprocesoru, pouze hledá připojené COM porty. Jejich seznam dynamicky vypíše do rozbalovací nabídky, z které si uživatel vybere příslušné zařízení. Při spuštění programu se to děje automaticky, pokud však zařízení nebylo připojeno, tlačítko **Hledej porty** příkaz provede znovu a zobrazí seznam portů. Následně tlačítko **Start** otevírá sériovou komunikaci, pokud by se něco nepodařilo, vypíše se varovná hláška a vrátí uživatele zpět na začátek programu.

11.2.2.2 Výpočet teplot

Příchozí data do programu jsou zpracovávána ověřením jejich správné délky, rozdělena na jednotlivé údaje a následně převedeny na dekadickou hodnotu pro další operace. Následně je vypočítán odpor z odměřených napětí pomocí vzorce (30), označení viz Obr. 28, pro čidla PT1000.

$$R = R_{ref} \cdot \frac{V_1 - V_2}{V_0 - V_1} \quad (30)$$

Následně se vypočítá teplota z odporu podle vzorců literatura [17]

Pro digitální čidlo ADT7410 stačí hodnotu vydělit 128, abychom dostali správný výsledek. Výsledky v programu jsou ukládány celou dobu na plný počet desetinných míst a pouze při tisku teplotu zaokrouhluji. Jelikož digitální čidlo funguje s přesností 0,25 °C bez kalibrace, je dostatečně přesné na to, abych podle něj nastavil i analogová čidla, která měla odchylku asi 2°C. To může být způsobeno právě třídou přesnosti samotných teplotních čidel a jejich referenčních odporů a také odporem drátu, který je asi 1 Ω.

11.2.2.3 Vykreslování grafu

Graf je vykreslován pomocí bloku chart. V principu jsem použil pole o 240 hodnotách, které každých 500 ms vytisknu do grafu. Aby graf budil dojem posouvajících se hodnot, jsou s každým krokem hodnoty v poli posunuty o 1 hodnotu směrem k nule a na poslední pozici se nahraje aktuální hodnota.

11.2.2.4 Automatická regulace

Z dosud nabytých znalostí při zkoumání komory jsem usoudil, že jde o soustavu nižšího řádu a proto jsem zde použil k automatické regulaci relé s hysterezí. To se nakonec osvědčilo jako dobrá volba. Hysterezi jsem zvolil 0,4 °C. Protože při ohřívání vznikal veliký překmit a ustálení soustavy trvalo velmi dlouho, byla regulace poupravena, takže samotný ohřev může mít teplotu pouze o 6 °C vyšší, než je teplota uvnitř respektive na druhém čidle. Dojde tedy k ztlumení soustavy. Při ohřevu nad 50 °C v termoboxu pak vznikal problém s velmi pomalým ohřevem, tudíž tato

úprava platí jen do 50°C poté je horní hranice omezena čidlem hlídající kritickou teplotu na ohřevu, což je 65°C.

11.2.2.5 Tisk tabulky

Pro tabulku jsem použil prvek DataGridView. Funkce mi tiskne do jednotlivých sloupců údaje o aktuálním času, teplotě v termoboxu, teplotě okolí, aktuálním stavu na H-Můstku a žádané teplotě. V jedné proměnné držím hodnotu počtu řádků, kterou s každým krokem inkrementuji, a tudíž vždy proběhne zápis na další řádek. Pokud chci hodnoty smazat, nastavím počet řádků na 1 a vynuluji proměnnou držící počet řádků. Funkci volám z časovače, který s každým napočítáním provede právě jednou operaci celé funkce. Vždy jsou vytištěny aktuální hodnoty držené v globálních proměnných. Pokud chci nastavit tisk hodnot v jiném časovém intervalu, nastavím jiný čas pro počítání časovači. Pokud chci tisk přerušit, časovač pozastavím.

11.2.2.6 Odesílání hodnot do mikroprocesoru

Jelikož mikroprocesor mění hodnoty s periodou asi 500 ms, zvolil jsem i periodu odesílání 500 ms. Odesílání se opět děje z časovače, který každých 500 ms vyčte aktuální stav proměnných a odešle je bez závislosti na tom, jestli se změnili nebo ne. Pokud bychom tento časovač zastavili, mikroprocesor do 3 sekund vypne napájení H-Můstku. Zde je i ošetřen stav, kdy by překročila hodnota ohřívání 65 °C. To se poté automaticky odešle hodnota na vypnutí napájení. Na polaritě zde nezáleží. Pokud se něco nepodaří nebo bude komunikace přerušena, program se zastaví a vyhodí hlášku o přerušené komunikaci a následně bude muset uživatel znovu otevřít komunikační port. Naměřená data v tabulce se nesmažou.

11.2.2.7 Animování tlačítek info

Protože jsem nenašel žádný blok nabízející animaci, vytvořil jsem funkce, které ji dokáží. V principu se jedná v prvek tlačítko (button), který má v sobě napsaný text „info“ a má předepsanou velikost. Po kliknutí na něj se odstartuje časovač, který s každým napočítáním zvětší tlačítko o 1 bod, až do požadované velikosti výšky a šířky. Zároveň se v tlačítku změni text na text s nápovědou. Při dalším kliknutí se tlačítko opět sbalí a vypíše text info. Pro změnu rychlosti animace stačí změnit délku časovače. Rozbalování je omezeno vždy na jedno tlačítko, které se musí opět sbalit před rozbalením dalšího.

12 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

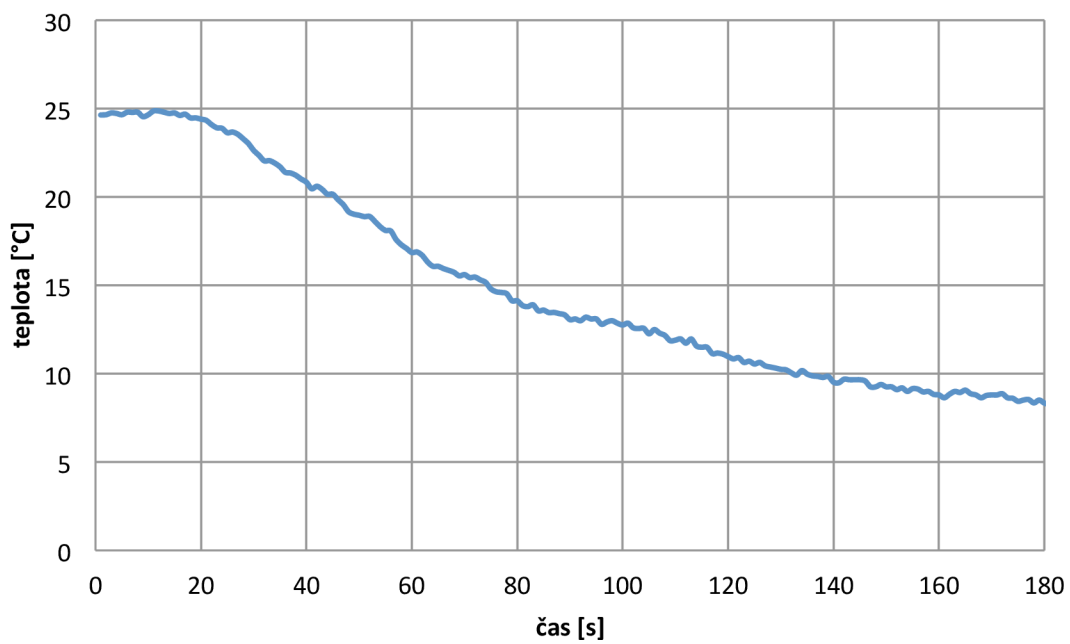
V grafech jsou zachyceny odezvy soustavy při měření. Čáry jsou logicky pojmenovány, kde:

- žádaná = uživatelem požadovaná teplota
- uvnitř nebo aktuální = teplota vzduchu v termoboxu
- chladič = teplota vzduchu foukaná ventilátory do komory
- zásah = stav systému, kdy se snaží topit, chladit nebo být neaktivní, skok o -1 znamená chlazení, skok o +1 znamená ohřev

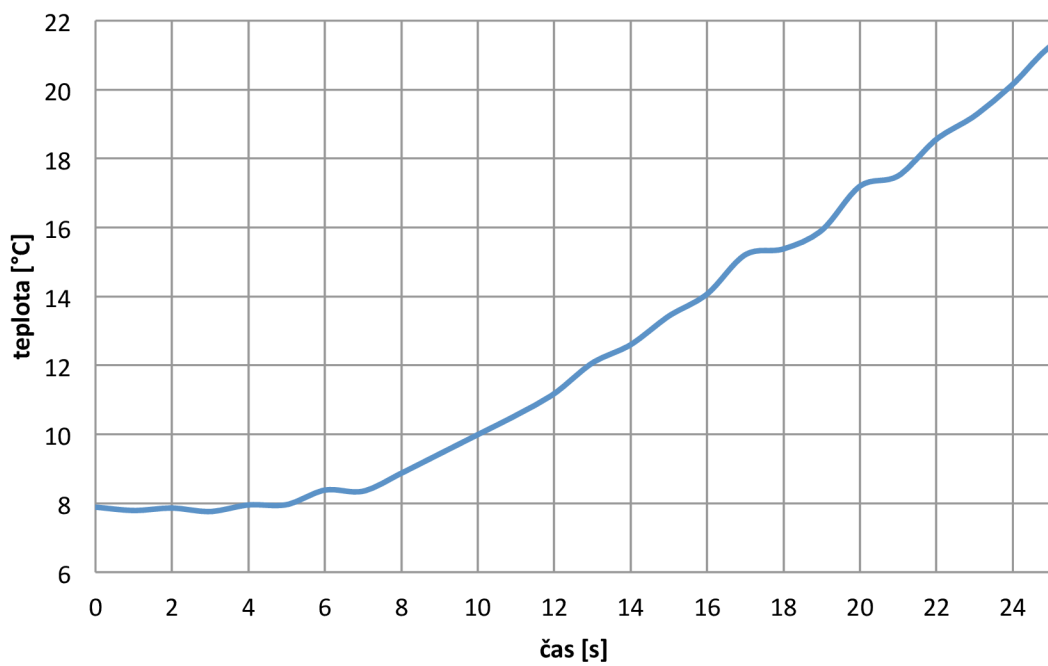
Nejprve jsem si odměřil rychlost, s jakou se dokáže komora zahřívat a ochlazovat. Z graf 17 a graf 18 je vidět nepoměr mezi dobou ohřívání a ochlazování, kde ohřev je několikanásobně rychlejší. Po nastavení žádané hodnoty v graf 19 je vidět, že na rychlost ohřevu nedokáže ochlazování zareagovat s dostatečnou rychlostí a teplota v komoře se liší a až o 3 °C oproti žádané teplotě. Soustavu jsem tedy při ohřevu zatlumil dle 11.2.2.4, tak že první překmit není tak veliký.

Konečně nastavená regulace je vidět v graf 21. Měním zde skokově žádanou hodnotu teploty a čekám, jak se teplota v komoře přizpůsobí. Poté jsem v graf 22 udělal výřez z graf 21 pro zachycení detailu překmitu při nastavování žádané hodnoty. Je vidět, že odchylka od žádané teploty je již kolem 1 °C. Poté jsem udělal půl hodinový test (graf 23), kdy jsem sledoval teplotu vháněnou do prostoru komory a teplotu v samotné komoře. Rozsah změny teploty v komoře byl po celou dobu do 2 °C. Kdy odchylka byla symetrická kolem žádané hodnoty plus 1 °C.

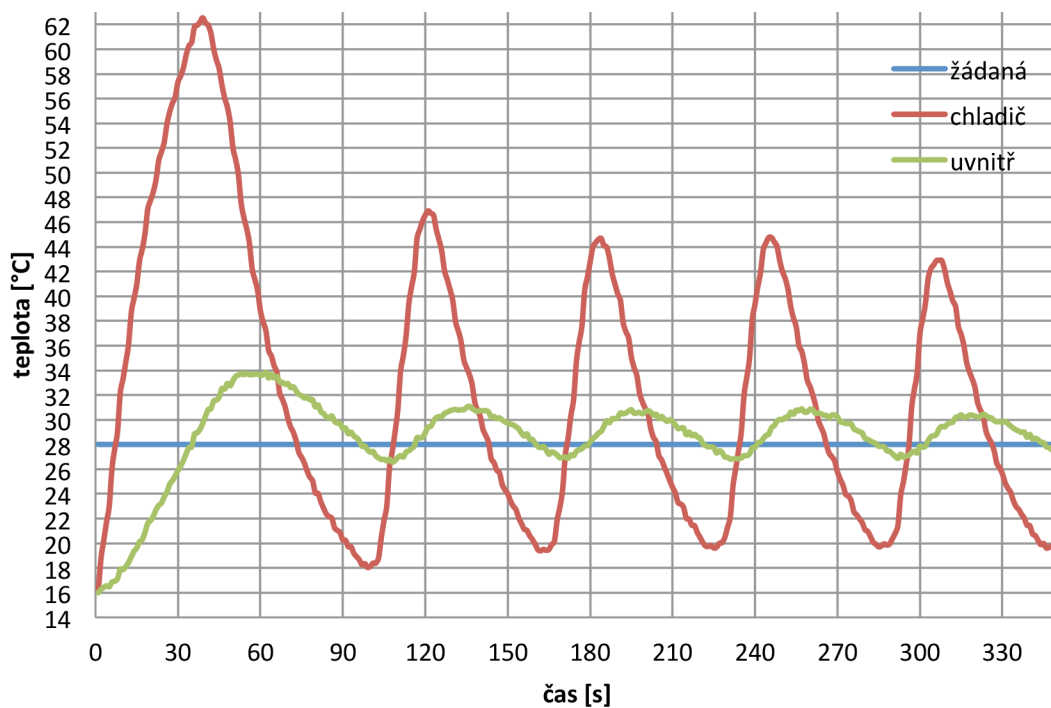
Předpokládám, že měřená součástka v komoře bude mít ještě větší teplotní setrvačnost než vzduch a teplota na součástce by poté byla prakticky konstantní s minimální odchylkou.



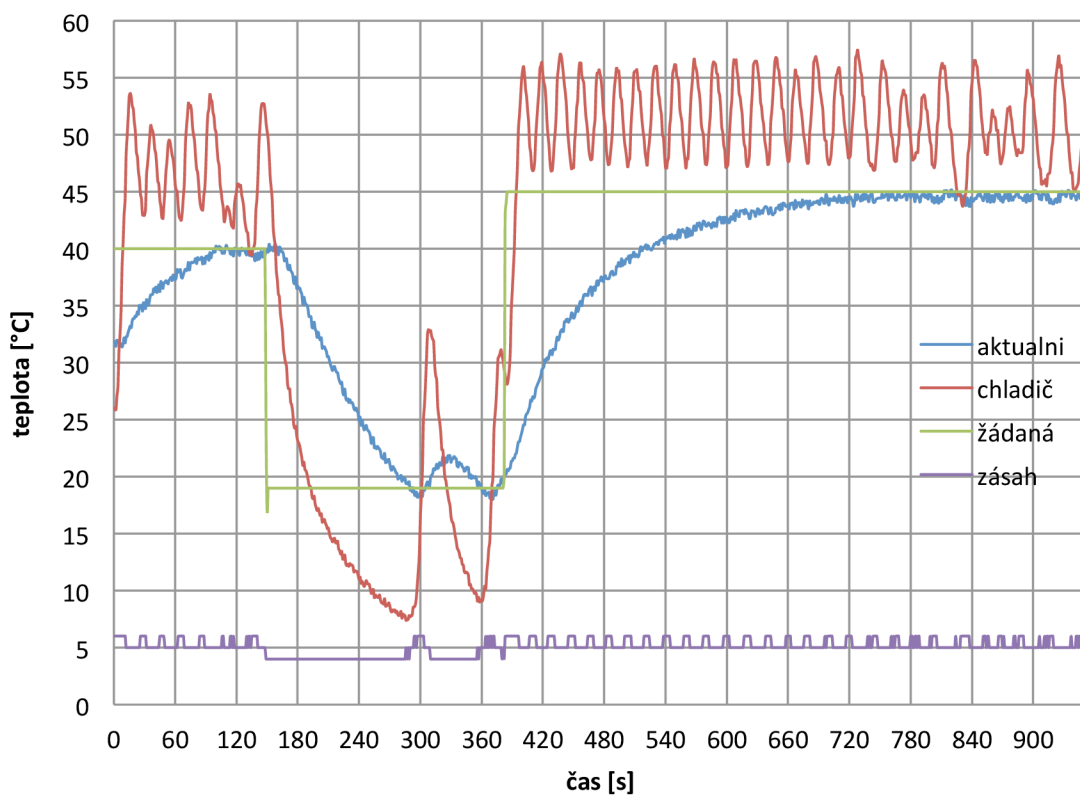
graf 17 Ochlazování termoboxu plným výkonem



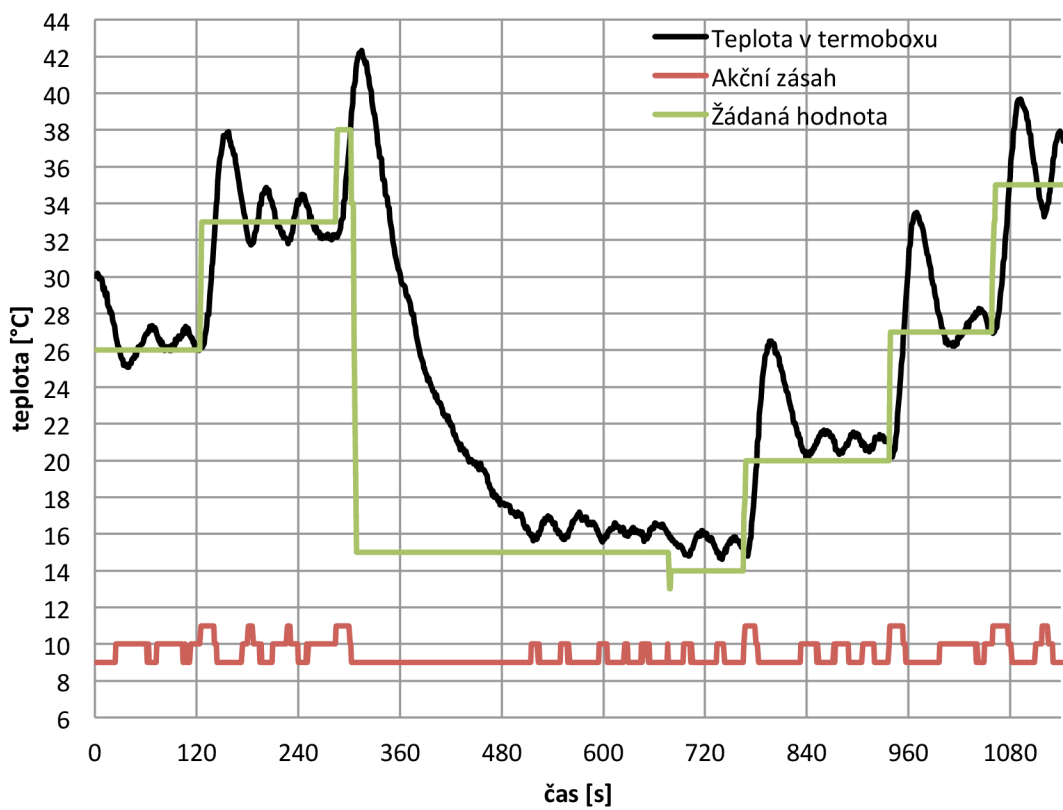
graf 18 Ohřívání termoboxu plným výkonem



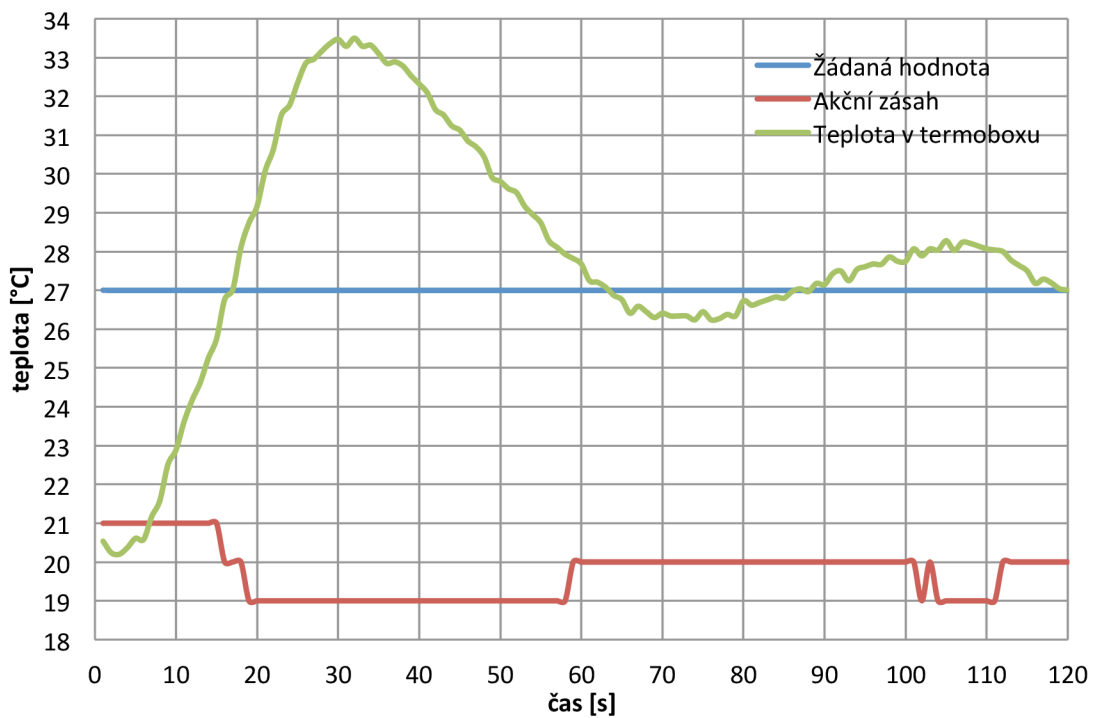
graf 19 Ustalování teploty bez omezení překmitu



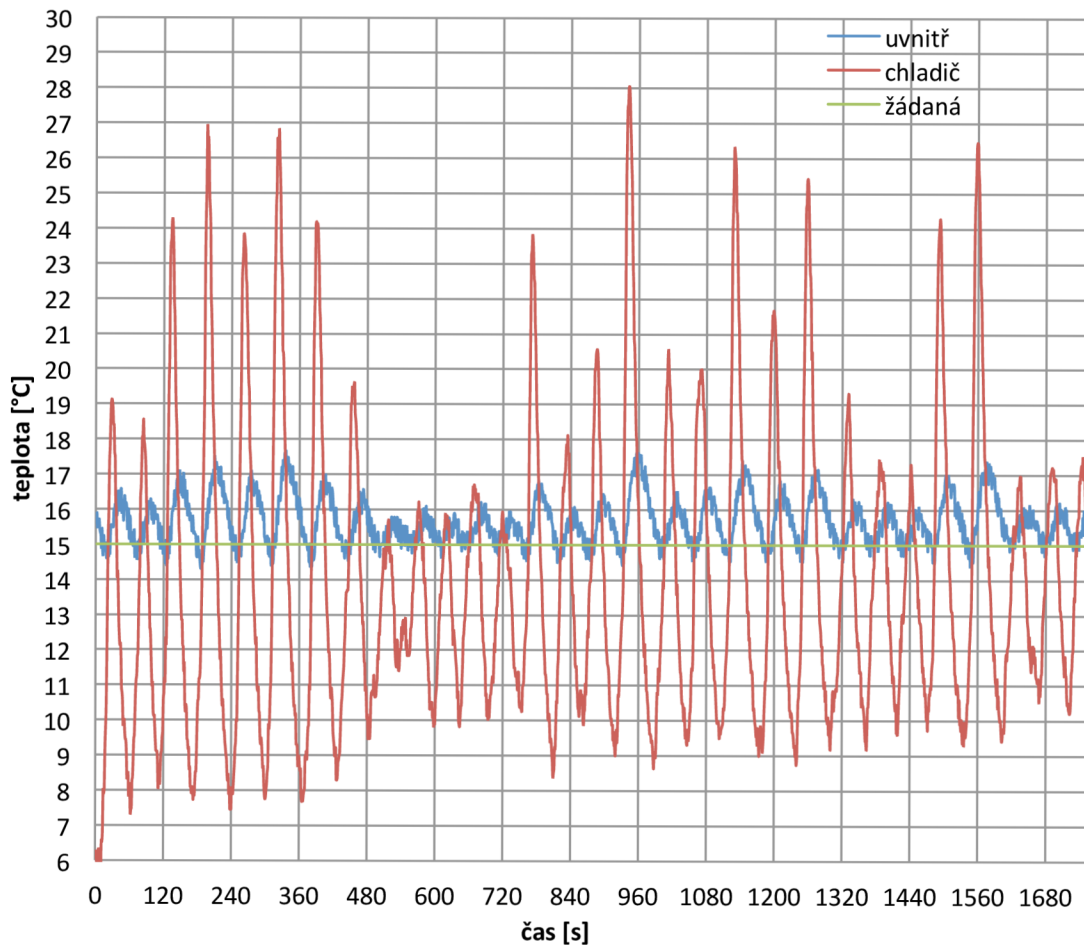
graf 20 Princip nastavení teploty s utlumením



graf 21 Chování termoboxu při změně žádané hodnoty



graf 22 Detail překmitu při nastavování žádané hodnoty



graf 23 Půl hodinový test udržení konstantní teploty 15 °C v komoře

13 ZÁVĚR

Po provedení literární rešerše jsem se rozhodl, použít pro venkovní stranu Peltierova článku chlazení nuceným oběhem kapaliny a pro stranu uvnitř boxu chlazení nuceným oběhem vzduchu. Zvolil jsem dvojici Peltierových článků TEC1-12710. Materiál celého termoboxu je z pěnového polystyrenu (EPS). Jako zásobník vody slouží akvárium, které má výhodu ochlazování kapaliny ledem. Do oběhu se kapalina dostane díky čerpadlu o výkonu 1200 l/hod. Čerpadlo má dostatečnou rychlost a voda se v celém okruhu neohřeje o více než 3 °C i přesto, že chlazený výkon je 300W.

Komora umožňuje dosáhnout teploty 0 °C při teplotě vody 20 °C. A horní teplotní hranice je omezena teplotou tání polystyrenu, která začíná na 70 °C.

Výpočet tepelného odporu boxu jsem provedl pomocí matematických vzorců a následně jej ověřil měřeními a také simulací. Teplotní odpor termoboxu o tloušťce stěny 35mm je 4,49 KW⁻¹.

Simulací v programu ANSYS jsem zjistil rozložení teplot v boxu a rychlost proudění. Dále mi ukázala, kudy z boxu odchází nejvíce tepla. Pro jednoduchost simulace jsem komoru pouze vytápěl pomocí rezistorů. Při porovnání simulace s reálným měřením se mi teplota průměrně nelišila o více než 3°C, což je dobrý výsledek.

Možnost regulovat teplotu v komoře dělí návrh na dvě části - hardwarovou a softwarovou. K návrhu řídicí elektroniky jsem použil mikroprocesor CY8C27443-PXI, teplotní čidla PT1000 a ADT7410, FTDI čip pro USB komunikaci s PC a H-Mústek pro ovládání Peltierových článků. Poté jsem mikroprocesor naprogramoval v prostředí PSoC Designer 5.2 jazykem C a vytvořil program v C# pro Windows v programu Microsoft Visual Studio 2010 Premium.

Naměřené výsledky dokázaly reálnost řešení. Komora je automaticky regulovatelná v rozsahu 10 – 60 °C a odchylka od žádané teploty je většinou do 2 °C.

Oblasti práce, které by mohly být dále zlepšeny, jsou regulace, teplotní čidla, výpočet chyb měření a regulace a výroba DPS z SMD součástek. Tyto věci by mohly odchylku teploty zmenšit. Je však otázkou, jestli je to nutné vzhledem k tomu, že součástka bude mít několikanásobně větší teplotní setrvačnost než vzduch, a teplota se bude na ní měnit pomaleji než ve vzduchu.

LITERATURA

- [1] AKSENOV, A. I., D. N. GLUŠKOVA a V. I. IVANOV. *Chlazení polovodičových součástek*. Praha, SNTL 1975.
- [2] KUBINA, Pavel. *Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů* [online]. 2011 [cit. 2012-12-30]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30765.
- [3] LIQUIDFUNK. *Vodní chlazení: test ...* [online]. 2004 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: http://pctuning.tyden.cz/hardware/skrine-zdroje-chladice/4107-vodni_chlazení-test.
- [4] NEKVAPIL, Vojtěch a Jan SKÁCEL. *Moderní vodní chlazení a co byste o něm měli vědět* [online]. 2007 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: http://pctuning.tyden.cz/navody/upravy-snizeni-hluku/9911-moderni_vodni_chlazení_a_co_byste_o_nem_meli_vedet.
- [5] *Peltierův článek* [online], poslední aktualizace 27. září 2012 23:45 [cit. 2012-12-26], Wikipedie. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltier%C5%AFv_%C4%8Dl%C3%A1nek.
- [6] BLEJCHAR, Tomáš. *Návody do cvičení „Modelování proudění“ – CFX* [online]. 2009 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Blejchar-CFX.pdf>.
- [7] AGILENT. *Agilent VEE Pro 9.0 & Agilent VEE Express 9.0 Quick Start Guide* [online]. 2008 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: http://www.htest.cz/download/VEE90_QSG.pdf.
- [8] ANSYS, Inc. *ANSYS CFX-Solver Modeling Guide* [online]. 2010 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: http://www1.ansys.com/customer/content/documentation/130/cfx_mod.pdf.
- [9] EPS ČR, Sdružení. *Vlastnosti expandovaného pěnového polystyrenu (EPS)* [online]. 2012 [cit. 2012-12-26]. Dostupný z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/tepelne-izolace/8482-vlastnosti-expandovaneho-penoveho-polystyrenu-eps>.
- [10] SIEBEN, Vincent. *A High Powe H-Bridge* [online]. 2003 [cit. 2013-04-14]. Dostupný z WWW: <http://www.engsoc.org/~bbarnes/project/reference/hbridge-reference-ualberta-arvp.pdf>.
- [11] STORR, Wayne. *Basic Electronics Tutorials* [online]. 2013 [cit. 2013-04-14] Dostupný z WWW: http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_7.html.

- [12] FTDI. *Firemní stránky* [online]. 2012 [cit. 2013-04-14] Dostupný z WWW: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT230X.html>.
- [13] CYPRESS. *Firemní stránky* [online]. 2013 [cit. 2013-04-14] Dostupný z WWW: <http://www.cypress.com/?mpn=CY8C27443-24PXL>.
- [14] RAAJA, Ganesh. *AN2120 RTD Temperature Measurement* [online]. 2012 [cit. 2013-04-27] Dostupný z WWW: http://www.psocdeveloper.com/uploads/tx_piapappnote/an2120.pdf.
- [15] MICROSOFT. *Visual C# Resources* [online]. 2013 [cit. 2013-04-27] Dostupný z WWW: <http://msdn.microsoft.com/en-us/vstudio/hh341490.aspx>.
- [16] MICROSOFT, *Visual C#* [online]. 2013 [cit. 2013-04-27] Dostupný z WWW: <http://social.msdn.microsoft.com/Forums/cs-CZ/vcsharpcs/threads>.
- [17] CYNTEC CO, *PT1000* [online]. 2013 [cit. 2013-04-27] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/530/530-110/dsh.530-110.1.pdf>.
- [18] ESS, Davis. *AN2096 Using the ADCINC Analog to Digital Converter* [online]. 2012 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <http://www.cypress.com/?docID=36701>.
- [19] CYPRESS. *Incremental ADC Datasheet* [online]. 2012 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <http://www.cypress.com/?docID=40544>.
- [20] STAVBY. *Polystyreny EU* [online]. 2013 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <http://www.polystyreny.eu/>.
- [21] SVS FEM. *ANSYS* [online]. 2013 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <https://www.svsfem.cz>.
- [22] POLÁK. *Teplo v experimentech* [online]. 2012 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/10-25-Polak.html>.
- [23] MURTINGER, Karel. *Tepelné izolace* [online]. 2010 [cit. 2013-05-04] Dostupný z WWW: <http://www.nazeleno.cz/stavba/izolace-2/tepelne-izolace-polystyren-mineralni-vata-a-dalsi.aspx>.
- [24] GME. *Datasheet M-TEC1-12710* [online]. 2012 [cit. 2013-05-14] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/601/601-012/dsh.601-012.1.pdf>.
- [25] GME. *Datasheet IRF4905* [online]. 2013 [cit. 2013-05-14] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/213/213-170/dsh.213-170.1.pdf>.
- [26] GME. *Datasheet IRF3205* [online]. 2013 [cit. 2013-05-14] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/213/213-189/dsh.213-189.1.pdf>.
- [27] GME. *Datasheet ST 7815* [online]. 2013 [cit. 2013-05-14] Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/dokumentace/330/330-006/dsh.330-006.2.pdf>.

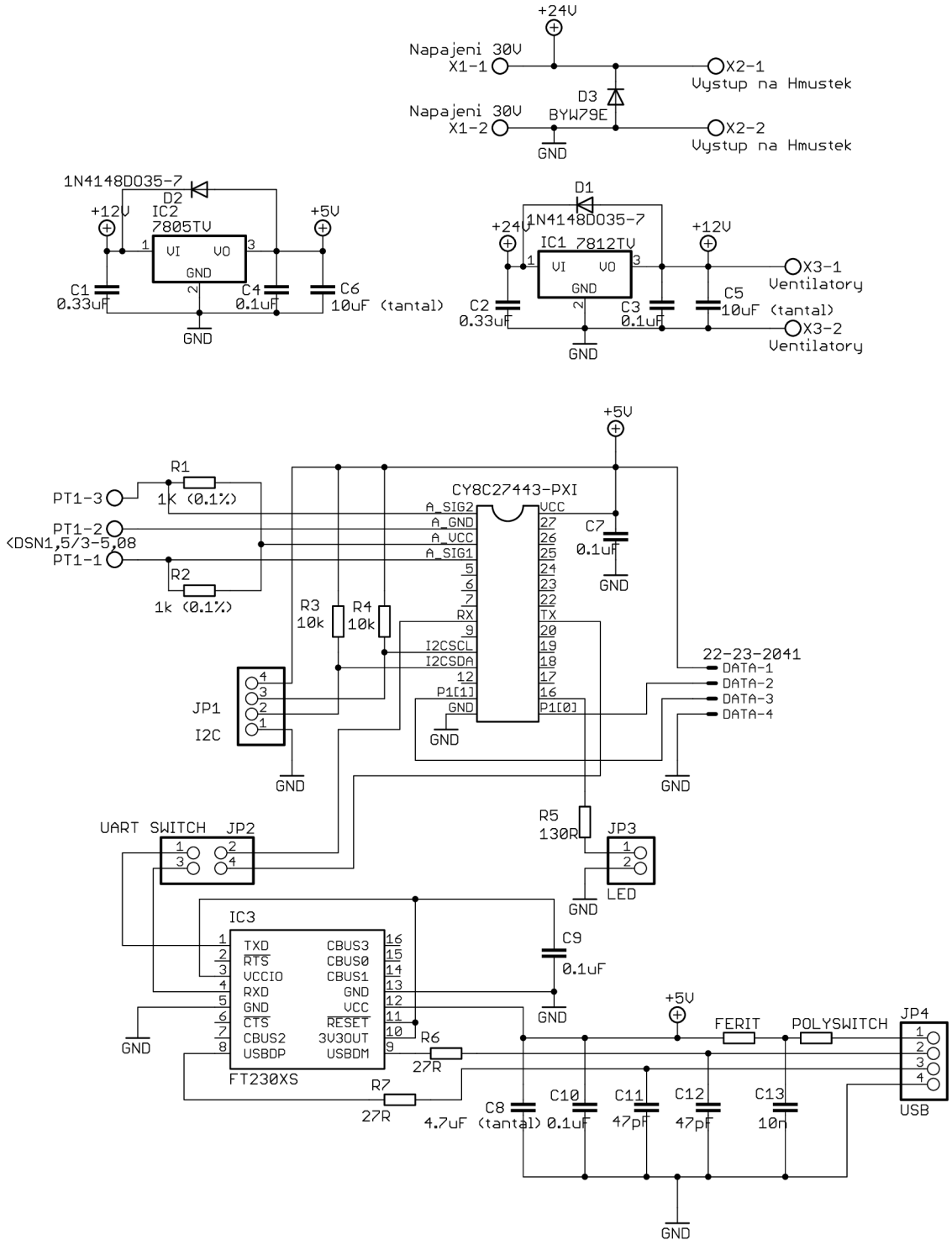
- [28] ANALOG DEVICES. *Datasheet ADT7410* [online]. 2013 [cit. 2013-05-14]
Dostupný z WWW: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADT7410.pdf.

SEZNAM PŘÍLOH

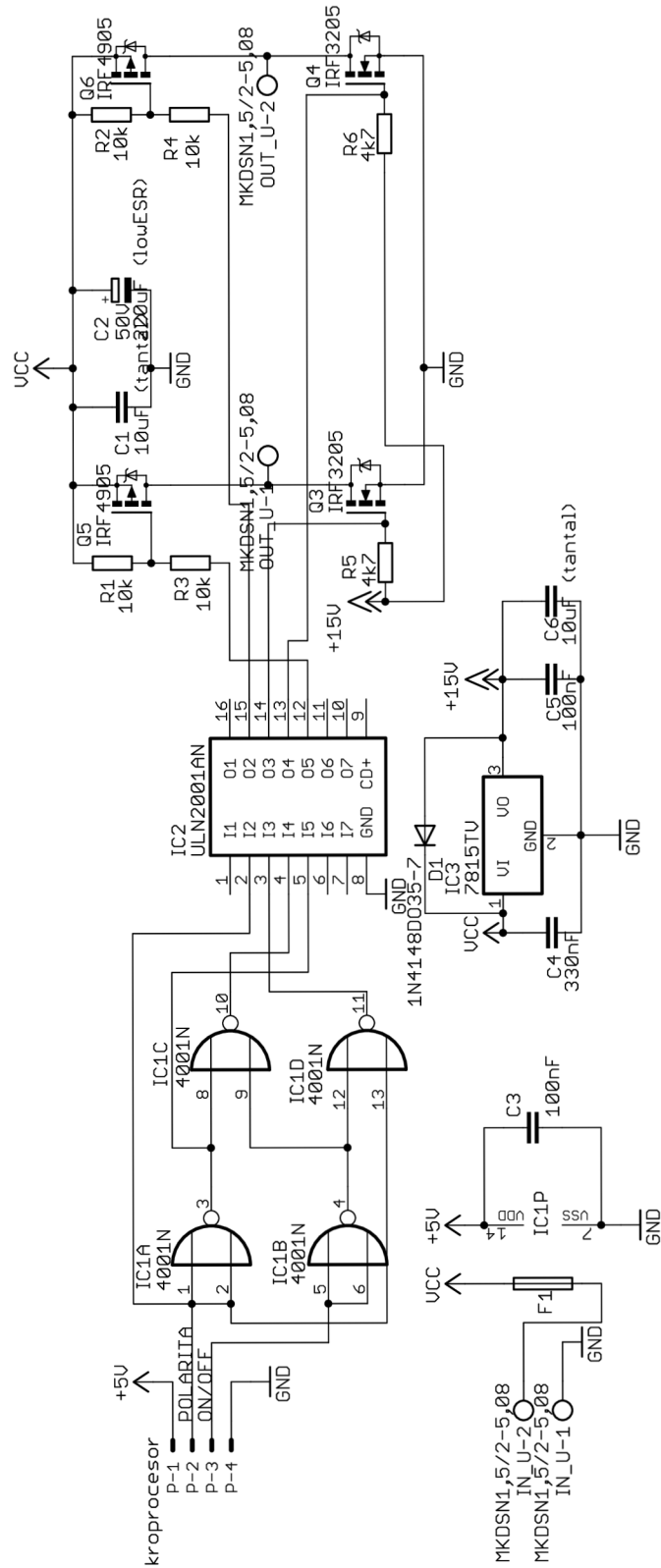
A	Návrh zařízení.....	79
A.1	Obvodové zapojení řídicí části (mikroprocesor)	79
A.2	Obvodové zapojení výkonové části (H-Můstek).....	80
A.3	Obvodové zapojení čelního panelu	81
A.4	Deska plošného spoje řídicí části – bottom	81
A.5	Rozmístění součástek řídicí části – top	82
A.6	Rozmístění součástek řídicí části – bottom	82
A.7	Deska plošného spoje výkonové části – bottom	83
A.8	Rozmístění součástek řídicí části – top	83
A.9	Deska plošného spoje čelního panelu – bottom	84
A.10	Rozmístění součástek čelního panelu – top	84
A.11	Rozmístění součástek čelního panelu – bottom	84
B	Seznam součástek	85
B.1	Seznam součástek řídicí části s mikroprocesorem	85
B.2	Seznam součástek čelního panelu	87
B.3	Seznam součástek H-Můstku.....	88
B.4	Seznam ostatních součástek.....	89
	Obsah přiloženého DVD nosiče	90

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

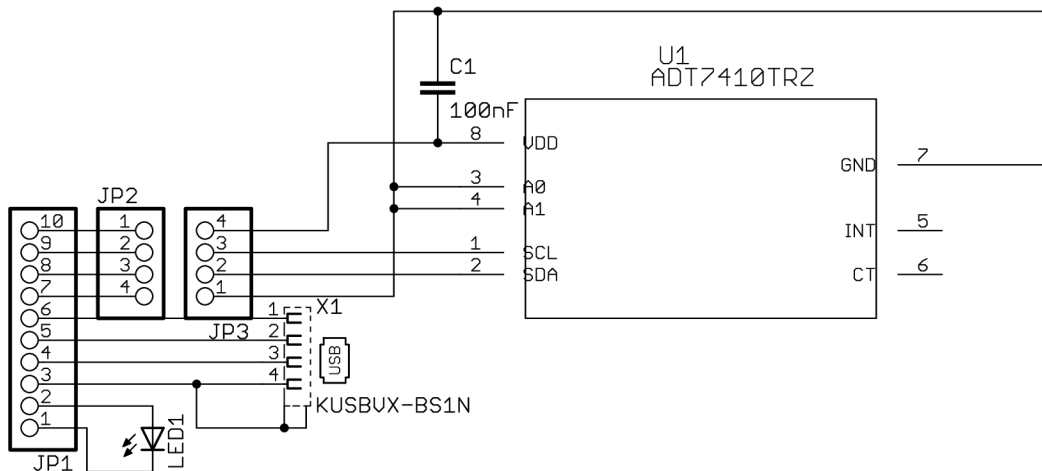
A.1 Obvodové zapojení řídicí části (mikroprocesor)



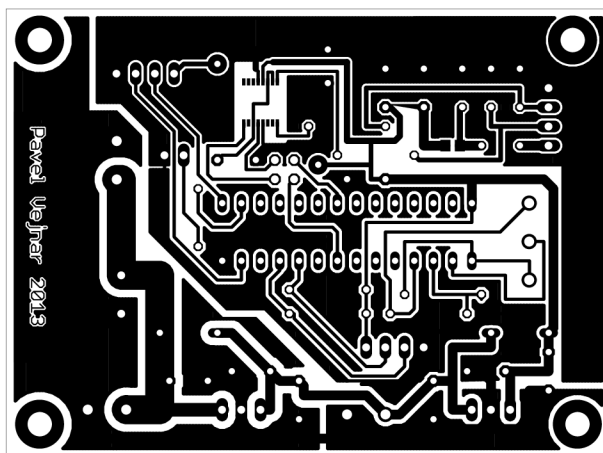
A.2 Obvodové zapojení výkonové části (H-Můstek)



A.3 Obvodové zapojení čelního panelu

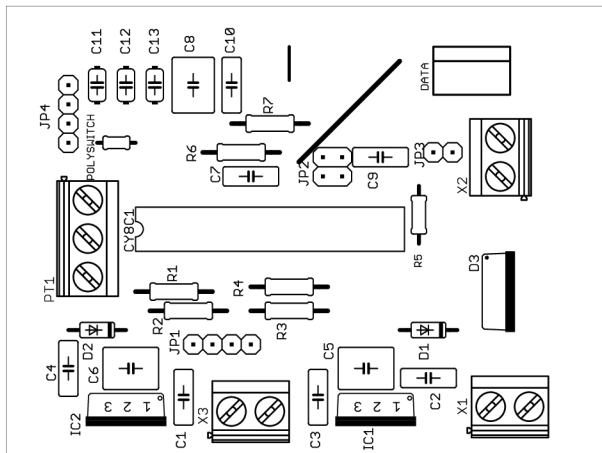


A.4 Deska plošného spoje řídicí části – bottom

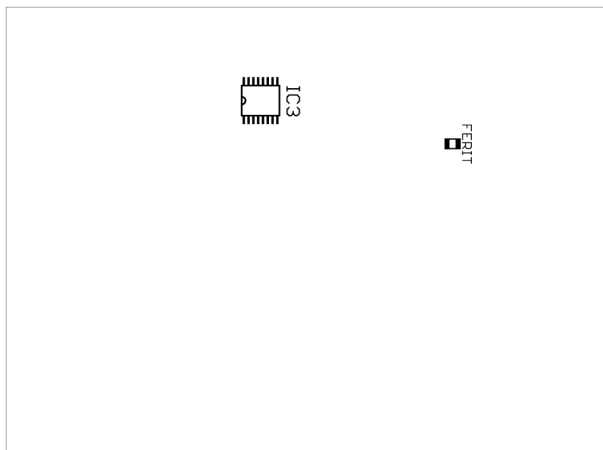


Rozměr desky 80 x 60 [mm], měřítko M1:1

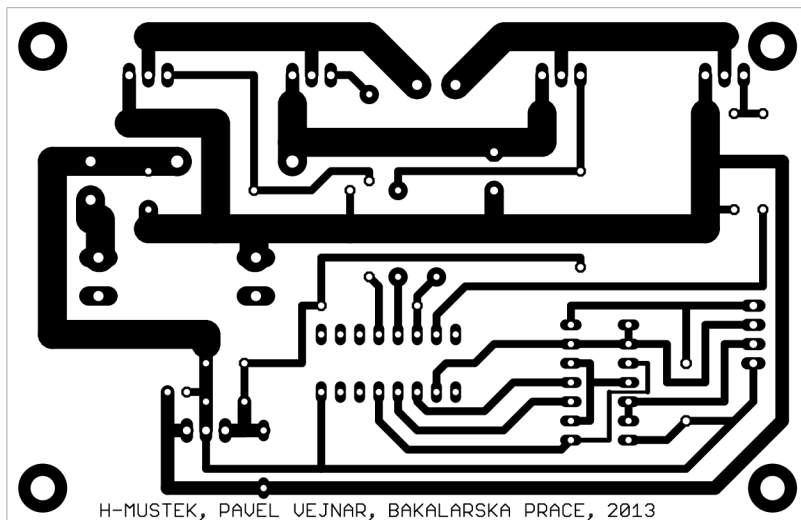
A.5 Rozmístění součástek řídicí části – top



A.6 Rozmístění součástek řídicí části – bottom

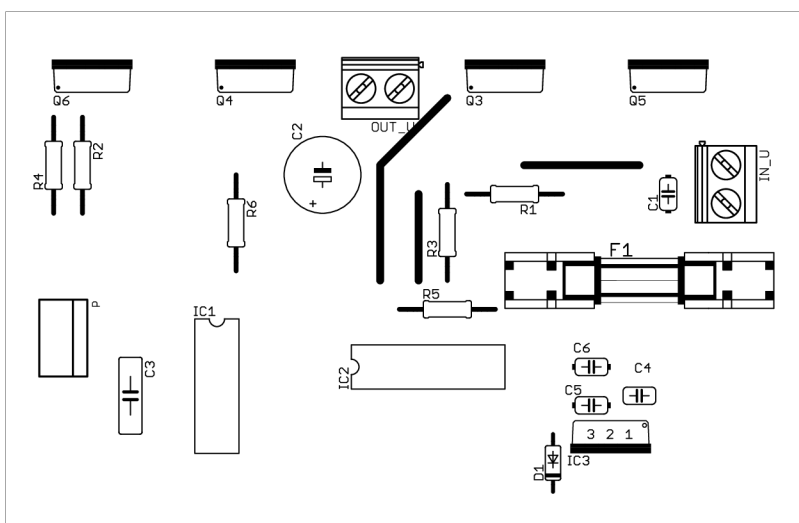


A.7 Deska plošného spoje výkonové části – bottom

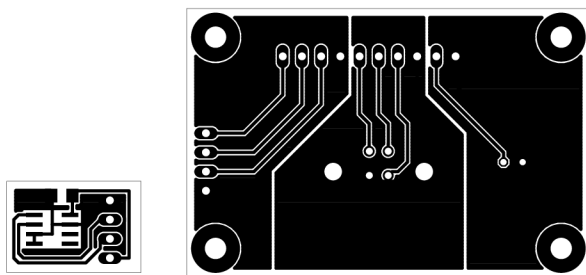


Rozměr desky 106 x 69 [mm], měřítko M1:1

A.8 Rozmístění součástek řídicí části – top



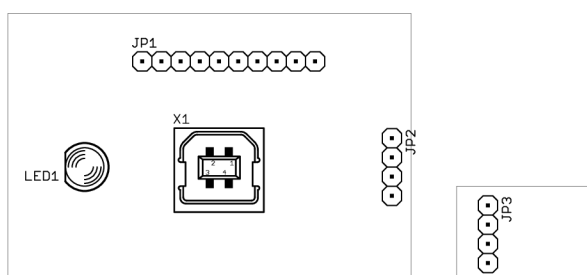
A.9 Deska plošného spoje čelního panelu – bottom



Rozměr desky 18 x 12 [mm] a 53 x 35, měřítko M1:1,

Desky se spojí přes piny tak, že jedna z nich se převrátí o 180°C a z vnější strany se spájí. Je to z důvodu, aby teplotní čidlo bylo co nejbližně vnější části, bude tedy ve směru vyčnívajícího USB portu.

A.10 Rozmístění součástek čelního panelu – top



A.11 Rozmístění součástek čelního panelu – bottom



B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Seznam součástek řídicí části s mikroprocesorem

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	0,33uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C2	0,33uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C3	0,1uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C4	0,1uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C5	10uF/35V	C5B5,5	Tantalový kondenzátor
C6	10uF/35V	C5B5,5	Tantalový kondenzátor
C7	0,1uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C8	4,7uF/35V	C5B5,5	Tantalový kondenzátor
C9	0,1uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C10	0,1uF	C5B2,5	Keramický kondenzátor
C11	47pF	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C12	47pF	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C13	10n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
CY8C1	CY8C27443-PXI	DIL28-3	mikroprocesor
D1	1N4148DO35-7	DO35-7	Dioda
D2	1N4148DO35-7	DO35-7	Dioda
D3	BYW79E	TO220ACS	Dioda
DATA	4x	K. Se zámkem	Konektor, DPS 2,54 mm
FERIT		R0805	feritová perla
IC1	7812TV	TO220V	P napěťový regulátor
IC2	7805TV	TO220V	napěťový regulátor
IC3	FT230XS	SSOP16	USB na UART
JP1	I2C	1X04	Piny do DPS
JP2	UART SWITCH	2X02	Piny do DPS
JP3	LED	1X02	Piny do DPS
JP4	USB	1X04	Piny do DPS
POLYSWITCH	200 mA	0204/5	Ochrana USB
PT1	Teplotní čidla	DSN1,5/3-5,08	Svorkovnice

R1	1K (0,1%)	0207/10	Metalizovaný rezistor
R2	1k (0,1%)	0207/10	Metalizovaný rezistor
R3	10k	0207/10	Metalizovaný rezistor
R4	10k	0207/10	Metalizovaný rezistor
R5	130R	0204/7	Metalizovaný rezistor
R6	27R	0207/10	Metalizovaný rezistor
R7	27R	0207/10	Metalizovaný rezistor
X1	Napajeni 30V	DSN1,5/2-5,08	Svorkovnice
X2	Vystup na mustek	DSN1,5/2-5,08	Svorkovnice
X3	Ventilatory	DSN1,5/2-5,08	Svorkovnice

B.2 Seznam součástek čelního panelu

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100nF	C1206	SMD kondenzátor
JP1	Mic	1X10	Piny do DPS 2,54 mm
JP2	I2C_OUT	1X04	Piny do DPS 2,54 mm
JP3	I2C_IN	1X04	Piny do DPS 2,54 mm
LED1	Zelená	LED5MM	LED
U1	ADT7410TRZ	SOIC	I2C digitální čidlo
X1	KUSBVX-BS1N	KUSBVX-BS1N	USB, typ B, vertikální orientace

B.3 Seznam součástek H-Můstku

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	10uF/35V	C050-024X044	Tantalový kondenzátor
C2	220uF/50V	E5-10,5	LowESR kondenzátor
C3	100nF	C075-032X103	Keramický kondenzátor
C4	330nF	C025-024X044	Keramický kondenzátor
C5	100nF	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C6	10uF/35V	C050-024X044	Tantalový kondenzátor
D1	1N4148	DO35-7	Dioda
F1	Pouzdro	SHKOG	Držák pojistky 5x20/6 x 32 mm
F1	12A	6,3x32	Pojistka
IC1	4001N	DIL14	4x 2 vstupový NOR
IC2	ULN2001AN	DIL16	Obvod s tranzistory
IC3	7815TV	TO220V	Kladný regulátor napětí
IN_U	2 zdířky	MKDSN1,5/2-5,08	Svorkovnice
OUT_U	2 zdířky	MKDSN1,5/2-5,08	Svorkovnice
P	4x	K. se zámkem	Konektor do DPS 2,54mm
Q3	IRF3205	TO220BV	MOS FET N-Kanál
Q4	IRF3205	TO220BV	MOS FET N-Kanál
Q5	IRF4905	TO220BV	MOS FET P-Kanál
Q6	IRF4905	TO220BV	MOS FET P-Kanál
R1	10k	0207/12	Metalizovaný rezistor
R2	10k	0207/12	Metalizovaný rezistor
R3	10k	0207/12	Metalizovaný rezistor
R4	10k	0207/12	Metalizovaný rezistor
R5	4k7	0207/12	Metalizovaný rezistor
R6	4k7	0207/12	Metalizovaný rezistor

B.4 Seznam ostatních součástek

Označení	Počet	Pouzdro	Popis
PT1000	2		Platinové čidlo
FAN	2	40x40 mm	Ventilátor 12V
M	1	40x40 mm	Mřížka pro ochranu ventil.
H1	7	20x20x15 mm	chladič V71103
U-KP28	1	257x127x49 mm	Krabička pro HW
KDR12	8	12 mm	Distanční sloupek
KDR17	4	17 mm	Distanční sloupek
LDC500	1	5 mm	slot pro LED
XINYA1	4	PFH02-04P	Konektor se zámkem
XINYA2	16	PFF02-01FG	Kontakt
XINYA3	2	S1G26 2,54 mm	Oboustranný kolík
JUMP	2	2,54 mm	Zkratovací propojka
Konektor	3	KONCP-SPK-2	Konektor PC
Konektor	2	KONCP-SPK-10	Konektor PC
KONPC	26	SPK-PI	Dutinka
Patice	1	SOKL 28U	pod mikroprocesor
USB	1m	kabel	A-B
F0927F	1m		smršťovací bužírka
FBK10H	2m	plochý drát	více žilový
Vodič	3m	0,5 mm ²	dvojlinka
Vodič	2m	1 mm ²	dvojlinka
Termobox	1	210x160x210 mm	polystyrénový box
TEC1-12710	2	40x40 mm	Peltierův článek
Akvarium	1	40x30x40 cm	nebo větší
Čerpadlo	1	vodní	alespoň 500l/min
Blok	2	40x40 mm	vodní blok
Hadice	2m		mezi vodn. blok a čerpadlo
Pasta	10g	teplovodivá	Teplovodivá pasta
Chladič	2	40x40 mm	na Peltiery uvnitř

OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD NOSIČE

- Elektronická verze bakalářské práce
- Projekt modelu komory v programu ANSYS
- Projekt simulace H-Můstku v programu Multisim
- Projekty plošných spojů v programu Eagle
- Projekt firmwaru pro mikroprocesor v programu PSoC Designer
- Projekt programu TERMOBOX v programu Microsoft Visual Studio
- Spustitelný program TERMOBOX.exe
- Ovladače pro FTDI čip pro Windows