

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016

David Červínek



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH A REALIZACE MINIATURNÍ TEPLENÉ KOMORY

DESIGN OF MINIATURE THERMAL CHAMBER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Červínek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Chalupa

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	David Červínek
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	Ing. Jan Chalupa
Akademický rok:	2015/16

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

Návrh a realizace miniaturní tepelné komory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Regulovatelná tepelná komora je komplexní mechatronický systém. Při návrhu soustavy je nutná znalost mechaniky, elektrotechniky, termomechaniky, teorie měření a regulace. Pro dosažení kvalitní regulace a optimálního topného/chladicího výkonu je nezbytné vytvořit komplexní model systému. Komora je určena pro testování malých elektronických zařízení, které mají ztrátový výkon do 500mW. Požadovaný rozsah vnitřních teplot komory je -5°C až 80°C při teplotě okolí 25°C. Teplota bude snímána na několika místech pomocí vhodného digitálního čidla. Jako topný/chladicí element bude použit Peltierův článek.

Cíle bakalářské práce:

1. Proveďte rešerši na téma tepelné komory malých rozměrů.
2. Navrhněte a simulujte tepelnou komoru (objem vnitřního prostoru do 1 dm³). K modelování využijte přístupu Model Based Design.
3. Na základě simulací vyberte nejvhodnější koncept, komoru zkonstruujte a otestujte.
4. Výsledky simulací porovnejte s měřením na reálném systému
5. Pro řízení a ovládání využijte inteligentního dotykového displeje, který bude umožňovat nastavení libovolného teplotního profilu.
6. Zjistěte, jaký vliv má ztrátový výkon testovaného zařízení na dosažení minimální možné teploty v komoře.

Seznam literatury:

Kriedl, Marcel: Měření teploty - senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 230 s. ISBN 80-7300-145-4.

Jung, W.: Op Amp Applications Handbook. Burlington (USA): Newnes (Elsevier), 2005.

Dvorský, E.; Hejtmánková, P.: Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie. 1. vyd. Praha : BEN-technická literatura, 2005. 287 s. ISBN 80-7300-118-7.

Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2

Rowe, D. M.: CRC handbook of thermoelectrics. 1st ed. CRC Press, 1995. 701 s. ISBN 978-0849301469.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a výrobou miniaturní tepelné komory. Její hlavní užití bude testování vyvíjených zařízení v laboratořích Mechlabu. Při řešení byl využit Simulink pro simulaci teplotních změn. Pro simulaci LC filtru byl využit program LTspice IV. Jako chladicí/topný element je použit Peltierův článek. Pro výpočty a ovládání je použit 3.5“ dotykový displej programovaný v prostředí 4D Workshop. Finální zařízení je schopno automaticky udržovat předem zvolenou teplotu v rozmezí -13°C až 80°C. Teplota může být stacionární, nebo cyklující se mezi dvěma předvolenými teplotami. Uživatel má možnost zvolit si prioritní teplotu, podle které se bude vnitřní regulátor řídit.

Klíčová slova

Peltierův článek, simulace, termodynamické jevy, dotykový displej, 4D System, chlazení

Abstract

This thesis is about designing and bulding temperature chamber. Main use for this chamber is to test devices which are designed in Mechlab laboratory. While I was developing this chamber I used Simuling for simulation of thermodynamic events. For LC filter simulation I used LTspice IV. Peltiers device is used as cooling/heating element. For calculation and control is used 3.5“ touch screen programmed in 4D Workshop. Final device is capable to automatically maintain set temperature in range of -13°C to 80°C. Temperature can be set as stationary or cyclic between two predefined temperatures. User can also choose temperature that will be used by regulator.

Keywords

Peltiers device, simulation, thermodynamic events, touch screen, 4D System, cooling

Bibliografická citace práce

ČERVÍNEK, D. *Návrh a realizace miniaturní tepelné komory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Chalupa

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne

.....

David Červínek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Janu Chalupovi za konstruktivní poznámky a za ochotu vysvětlit vše co bylo potřeba. Velké díky patří také doc. Ing. Radku Vlachovi, Ph.D, který mi vysvětlil jak fungují termodynamické jevy a tím mi umožnil vytvořit funkční model komory. Za to, že vůbec můžu studovat na vysoké škole chci poděkovat rodičům, bez kterých by to nebylo možné.

Seznam obrázků

Obrázek 1 Princip Peltierova článku.....	14
Obrázek 2 Tepelná soustava reprezentující komoru	15
Obrázek 3 Grafy popisující chování Peltierova článku [3]	17
Obrázek 4 (2.9) přepsaná do prostředí Simulinku	19
Obrázek 5 (2.10) přepsaná do prostředí Simulinku	19
Obrázek 6 (2.11) přepsaná do prostředí Simulink	20
Obrázek 7 rovnice Peltierova článku	20
Obrázek 8 PI regulátor tepelné soustavy	20
Obrázek 9 Peltierův článek s označením TEC1-12710 [3].....	21
Obrázek 10 Detail venkovního chladiče [5]	22
Obrázek 11 Primitivní sestava na seznámení se s funkcí Peltierova článku.....	23
Obrázek 12 Tepelný odpor vs. rychlost proudění vzduchu [6].....	23
Obrázek 13 Nosná konstrukce	25
Obrázek 14 Spojení počítačového chladiče-Peltierova článku-vnitřního chladiče.....	25
Obrázek 15 Pohled na zdroje tepla v počítačovém procesoru [7].....	26
Obrázek 16 Teplotní senzor DALLAS 18B20 [8].....	27
Obrázek 17 Základní zapojení IO spínaného zdroje TPS5420 [9]	28
Obrázek 18 Schéma spínaných zdrojů	29
Obrázek 19 schéma a hodnoty LC filtru	30
Obrázek 20 Použitý displej uLCD-35DT [10].....	31
Obrázek 21 Zapojení čidla DALLAS 18B20.....	32
Obrázek 22 Příklad kódu komunikace s čidlem teploty	33
Obrázek 23 Úvodní obrazovka ovládacího programu	33
Obrázek 24 Obrazovka "Nastavení teploty"	34
Obrázek 25 "Statická hodnota"	34
Obrázek 26 Oscilace	35
Obrázek 27 Řídící teplota	35
Obrázek 28 Graf teplot (vodorovná osa představuje 429s).....	36
Obrázek 29 Teploty čidel.....	36
Obrázek 30 Napětí na Peltierových článcích = 12V, ztrátový výkon uvnitř komory = 0W (chlazení).....	37
Obrázek 31 Napětí na Peltierových článcích = 15V, ztrátový výkon uvnitř komory = 0W (chlazení).....	37
Obrázek 32 Napětí 8,9V (vyhřívání)	38
Obrázek 33 Napětí = 12V / ztrátový výkon uvnitř komory = 0,5W	38
Obrázek 34 Rozdíl mezi vypnutým a zapnutým vnitřním větrákem.....	39
Obrázek 35 Výsledné teploty simulace 12V/ zátěž = 0W	40
Obrázek 36 Layout napájecí desky 12V/5V spodní vrstva.....	44
Obrázek 37 Layout napájecí desky 12V/5V vrchní vrstva	44

Seznam tabulek

Tabulka 1 Význam členů rovnice (2.1) a (2.2)	14
Tabulka 2 Detailní popis tepelné soustavy	15
Tabulka 3 Vlastnosti Peltierova článku s označením TEC1-12710 [1]	30
Tabulka 4 Vlastnosti komerčně dostupných zařízení	41

Seznam příloh

Přílohy na CD:

- display_program – obsahuje program do displeje
- DPS_zdroje_12V_5V – obsahuje elektronické schéma a rozložení DPS(desky plošných spojů)
- obrázky – obrazová dokumentace z průběhu tvoření práce, obrázky použité v práci v lepším rozlišení
- simulace_LC_filtru – simulace použitého LC filtru az účelem určení zvlnění proudu
- simulace_tepelné_komory – obsahuje soubory potřebné pro simulaci tepelných dějů v komoře
- DALLAS_18B20 – obsahuje všechna dodatečná nastavení tepltoních čidel
- Datasheer 12710 – parametry použitých Peltierových článků
- DIABLO16_internalfunctions_R_1_15 – soubor obsahující všechny funkce použitého displeje
- Modelování peltieru – potřebné rovnice a teorie pro přesné popsání Peltierova článku

Přílohy:

- DPS layout zdrojů 12V a 5V bottom/top

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Rešeršní část.....	13
2.1	Plánované použití a předměty ke chlazení	13
2.2	Chladicí element.....	13
2.2.1	Tekutý dusík.....	13
2.2.2	Absorpční chlazení.....	13
2.2.3	Peltierův článek.....	13
2.3	Teorie tepelné soustavy.....	15
2.4	Simulování tepelné soustavy	16
2.5	Řízení	18
2.6	Regulace.....	18
2.7	Plug&Go	18
3	Praktické řešení	19
3.1	Simulace.....	19
3.2	Výběr Peltierova článku.....	20
3.3	Konstrukce	21
3.3.1	Izolační materiál.....	21
3.3.2	Chlazení	22
3.3.3	Nosná konstrukce z dřevotřísky	24
3.3.4	Spojení a instalace Peltierových článků a chladičů.....	25
3.3.5	Čidla teploty	27
3.4	Výkonová a napájecí část.....	28
3.4.1	Zdroje napětí	28
3.4.2	Řízení výkonu Peltierova článku.....	29
3.5	Display & teplotní čidla	31
3.5.1	Vlastnosti a popis displeje.....	31
3.5.2	Programování displeje.....	31
3.5.3	Klady / Zápory použitého displeje	32
3.5.4	Vhodnost displeje pro aplikaci na tepelné komoře	32
3.5.5	Čidla	32
3.6	Software	33
3.6.1	Popis ovládacího programu.....	33
3.6.2	Příklad spuštění	36
4	Zhodnocení výsledků	37
4.1	Porovnání dosažených hodnot se zadáním BP	37
4.2	Porovnání termodynamického modelu v Simulinku a reálné zkoušky	39
4.3	Finální funkčnost.....	40
4.4	Porovnání s produkty na trhu	41
5	Závěr	42
6	Použité zdroje.....	43
7	Přílohy.....	44

1 Úvod

Při vývoji jakéhokoliv zařízení je potřeba jej testovat. Testovat se může odolnost vůči mechanickému zacházení, imunita vůči venkovnímu rušení, maximální rychlost přenosu dat atd. Pokud se jedná o zařízení které bude používáno venku je velmi důležitou zkouškou odolnost vůči extrémním teplotám. Důležité je kontrolovat nízké, ale i vysoké teploty. Takové testování je možné s tepelnou komorou která je výsledným produktem této práce.

Tepelná komora, kterou konstruuji jako bakalářský projekt by se dala popsat jako malá přenosná chladicí komora s možností nastavení vnitřní teploty v rozsahu -13°C až 80°C s důrazem na teplotu tělesa nebo vzduchu. Nemá možnost kontroly vlhkosti.

Při vývoji tepelné komory byly hlavními požadavky co nejnižší dosažitelná teplota a zároveň možnost ohřevu, lehká přenositelná konstrukce a možnost ovládání dotykovým displejem. Funkce chlazení a ohřevu je zajištěna Peltierovými články. Konstrukce je vyrobená z dřevotřísky a jako izolace je použita lehká extrudovaná polystyrenová pěna. Pro řízení je použit dotykový displej od firmy 4D Systems s názvem uLCD-35DT.

Práce má dvě hlavní části 1. Rešeršní část a 2. Praktické řešení. V rešeršní části se dozvíte všechny důležité teoretické informace a v praktické části je popis výroby komory. Během návrhu se mimo jiné setkám s tepelnými soustavami a jejich simulací pomocí Simulinku. Popisem funkce Peltierova článku z grafů které máme k dispozici a programování dotykového displeje.

V porovnání s nabídkou na trhu má tato komora výhodu v její velikosti, hmotnosti a při tak malém rozměru i možnost chlazení. Těchto vlastností jsme byli schopni dosáhnout díky použití Peltierových článků místo kompresorového chladiče, tím pádem odpadá hlučnost a hmotnost kompresoru.

Analýzou internetové nabídky jsem zjistil, že tepelné komory s podobnými vlastnostmi existují, ale nikdy se plně nevyrovnají této. Pokud si zavedeme jako hlavní kritéria hmotnost celého zařízení, rozsah dosažitelných teplot, vnitřní objem, pořizovací cena, cena provozu a spolehlivost zjistíme, že se tímto konceptem povedlo implementovat všechny vlastnosti které jsou potřeba do laboratoře Mechlabu. V kapitole 4.4 je stručný popis nejzajímavějších zařízení na trhu kde se můžete dočíst jejich základní parametry a porovnat s bakalářským projektem.

2 Rešeršní část

2.1 Plánované použití a předměty ke chlazení

Komora je vyráběna za účelem vývoje v laboratořích Mechlabu. Bude se používat například k testování baterií a jejich vlastností za nízkých teplot. Funkčnosti navržených zařízení a jejich použitelnosti v prostředí kde se dají očekávat výkyvy teplot. V komoře se dají testovat zařízení do ztrátového výkonu 0,5W. Při vyšším ztrátovém výkonu se zvedá minimální dosažitelná teplota. Toto omezení logicky neplatí pro testování vysokých teplot.

2.2 Chladicí element

Obecně jsou známy tři druhy chlazení na nižší teplotu než je teplota okolí. Chlazení tekutým dusíkem, absorpční chlazení a chlazení Peltierovými články.

2.2.1 Tekutý dusík

Chlazení tekutým dusíkem je nákladné a pro náš účel nevyhovující z důvodu složité manipulace. Mezi jeho výhody by se dalo zařadit schopnost dosáhnout extrémně nízkých teplot, ale nejsme jím schopni komoru vyhřívat.

2.2.2 Absorpční chlazení

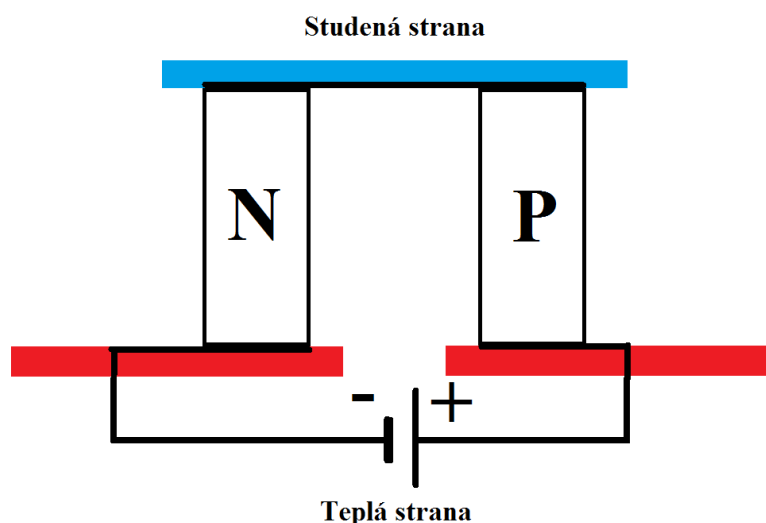
Použití absorpčního chlazení, které můžete najít třeba v lednici, má tu nevýhodu, že bych musel sestavit tepelné výměníky a rozvody přesně na míru naší potřebě a tím by se výroba podstatně časově prodloužila. Stále přetrvává stejný problém jako u předchozího principu a to neschopnost vyhřívat vnitřek komory což by vyžadovalo další zařízení na zvyšování teploty a tím by se uvnitř komory zaplnil další prostor.

2.2.3 Peltierův článek

Zařízení funguje na principu Peltierova jevu, který probíhá mezi přechody P a N polovodičových prvků, jak je zobrazeno na obrázku Obrázek 1. Jednotlivé „nohy“ jsou spojeny v sérii a teplotně jsou mezi dvěma keramickými deskami pro rovnoměrné rozložení teploty. K Peltierovu efektu je reverzní Seebeckův efekt který popisuje vzniklé napětí mezi konci kovové tyče když je na ní teplotní rozdíl ΔT .

Peltierův článek má nevýhody jako velmi malou účinnost při chlazení, velkou nelinearitu a proto je náročné pro něj navrhnout regulátor. Je velmi měkký zdroj chladicího výkonu. To znamená, že pokud je studená strana bez tepelné zátěže tak se dokáže vychladit na -30°C , ale pokud necháte plochu vystavenou teplotě vzduchu pak teplota studené strany výrazně stoupne. Toto chování lze vyčíst z Obrázek 3. I přes to je pro naši aplikaci nejvhodnějším chladicím elementem z následujících důvodů.

- dokáže vyhřívat i chladit (smysl se dá ovládat pouhou změnou toku proudu)
- rychlá odezva teplot na změnu napětí (v řádu sekund)
- absence pohyblivých částí => velmi nízká pravděpodobnost poruchy a teoreticky neomezená životnost



Obrázek 1 Princip Peltierova článku

Detailně můžeme Peltierův článek popsat následujícími rovnicemi, získanými v [1]:

$$Q_A = S \cdot I \cdot T_A - 0.5 \cdot I^2 \cdot R - \kappa_{th} \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

$$Q_E = S \cdot I \cdot T_E + 0.5 \cdot I^2 \cdot R - \kappa_{th} \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

S	[V/K]	Seebeckův koeficient
I	[A]	proud procházející článkem
T_A	[°C]	teplota studené strany
R	[Ω]	odpor Peltierova článku
κ_{th}	[W/(m·K)]	tepelná vodivost
ΔT	[°C]	teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou
Q_A	[W]	tepelný výkon odebíraný studenou stranou (A = absorbed)
Q_E	[W]	tepelný výkon vyzařovaný teplou stranou (E = emitted)

Tabulka 1 Význam členů rovnice (2.1) a (2.2)

První člen v rovnici značí Seebeckův efekt, který vytváří chladicí efekt na studené straně a vznik tepla na straně druhé. Druhý člen značí fakt, že podle teorie se Joulovo teplo, vytvářené průchodem proudu látkou o elektrickém odporu, rozděluje přesně na půl. Jedna část ohřívá teplou stranu a druhá ohřívá studenou stranu. Třetí člen je prostup teplot mezi stranami Peltierova článku (teplá strana ohřívá studenou a studená strana chladí teplou).

Z popisu výše je tedy jasné, že dobrý Peltierův článek musí mít velký Seebeckův koeficient, malý elektrický odpor a velký tepelný odpor.

2.3 Teorie tepelné soustavy

Tepelná soustava komory se navrhuje jako ekvivalentní elektrický obvod kde:

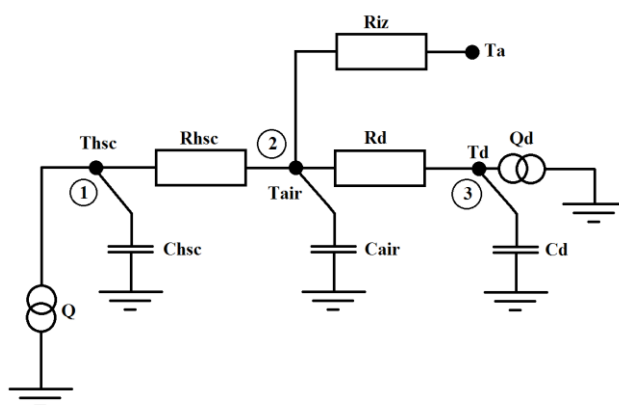
Termo		Elektro
$T[^{\circ}\text{C}]$	=	$U[\text{V}]$
$q[\text{W}]$	=	$I[\text{A}]$
$R[\text{K} \cdot \text{W}^{-1}]$	=	$R[\Omega]$
$C[\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}]$	=	$C[\text{F}]$

Můžeme také použít rovnici:

$$G = \frac{1}{R} \quad (2.3)$$

Kde G reprezentuje vodivost a R odpor.

Tepelnou soustavu komory jsem navrhl jako schéma na Obrázek 2 pomocí [2].



Obrázek 2 Tepelná soustava reprezentující komoru

Stručný popis jednotlivých částí: Q je chladicí/topící výkon Peltierova článku, zkratka „hsc“ znamená chladič na vnitřní straně komory, „iz“ značí izolaci, „air“ se vztahuje ke vzduchu a „d“ platí pro zařízení které, se do komory vloží.

Q	chladicí / topící výkon Peltierova článku
Qd	ztrátový výkon zařízení uvnitř komory
Tair	teplota vzduchu uvnitř komory
Td	teplota zařízení umístěného uvnitř komory
Ta	teplota okolí
Rhsc	tepelný odpor chladiče uvnitř komory
Riz	tepelný odpor izolačního materiálu
Rd	tepelný odpor pouzdra součástky
Chsc	tepelná kapacita chladiče uvnitř komory
Cair	tepelná kapacita vzduchu uvnitř komory
Cd	tepelná kapacita pouzdra součástky

Tabulka 2 Detailní popis tepelné soustavy

Z této soustavy dostaneme tři diferenciální rovnice které po vyřešení popisují teploty v jednotlivých uzlech (T_{hsc} , T_{air} , T_d). Rovnice jsem použil na vytvoření dynamického modelu v Simulinku.

Tepelný odpor izolace můžeme vypočítat podle následující rovnice:

$$R = \frac{\delta}{\lambda \cdot S} \quad (2.4)$$

Kde δ je šířka izolační vrstvy, λ je měrná tepelná vodivost a S je plocha izolační vrstvy. Tepelnou kapacitu můžeme vypočítat podle vzorce:

$$C = c \cdot m \quad (2.5)$$

kde c je měrná tepelná kapacita a m je hmotnost.

2.4 Simulování tepelné soustavy

Byly použity rovnice vytvořené z tepelné soustavy na Obrázek 2. které jsem přepsal do Simulinkovského prostředí, vytvořil doplňkový „Tepelna_komora_data.m“ file, ve kterém mám všechny potřebné výpočty, konstanty a ostatní data. Výsledky mi pomohly uvědomit si jak dlouho budou tepelné změny trvat a také jsem získal odhad dosažitelných teplot.

Rovnice se vztahují k uzlům 1-3 jako je vyznačeno na Obrázek 2 a mají následující tvar.

$$1) q_c = \frac{T_{air} - T_{hsc}}{R_{hsc}} - C_{hsc} \frac{dT_{hsc}}{dt} \quad (2.6)$$

$$2) \frac{T_{air} - T_{hsc}}{R_{hsc}} = \frac{T_a - T_{air}}{R_{iz}} + \frac{T_d - T_{air}}{R_d} - C_{air} \frac{dT_{air}}{dt} \quad (2.7)$$

$$3) \frac{T_d - T_{air}}{R_d} = q_D - C_d \frac{dT_d}{dt} \quad (2.8)$$

Rovnice jsou stejné jako u nabíjení RC článku v elektronice. Aby se daly v Simulinku vyřešit musíme je upravit do následujícího tvaru.

$$1) - \frac{q_c - \frac{T_{air} - T_{hsc}}{R_{hsc}}}{C_{hsc}} = \frac{dT_{hsc}}{dt} \quad (2.9)$$

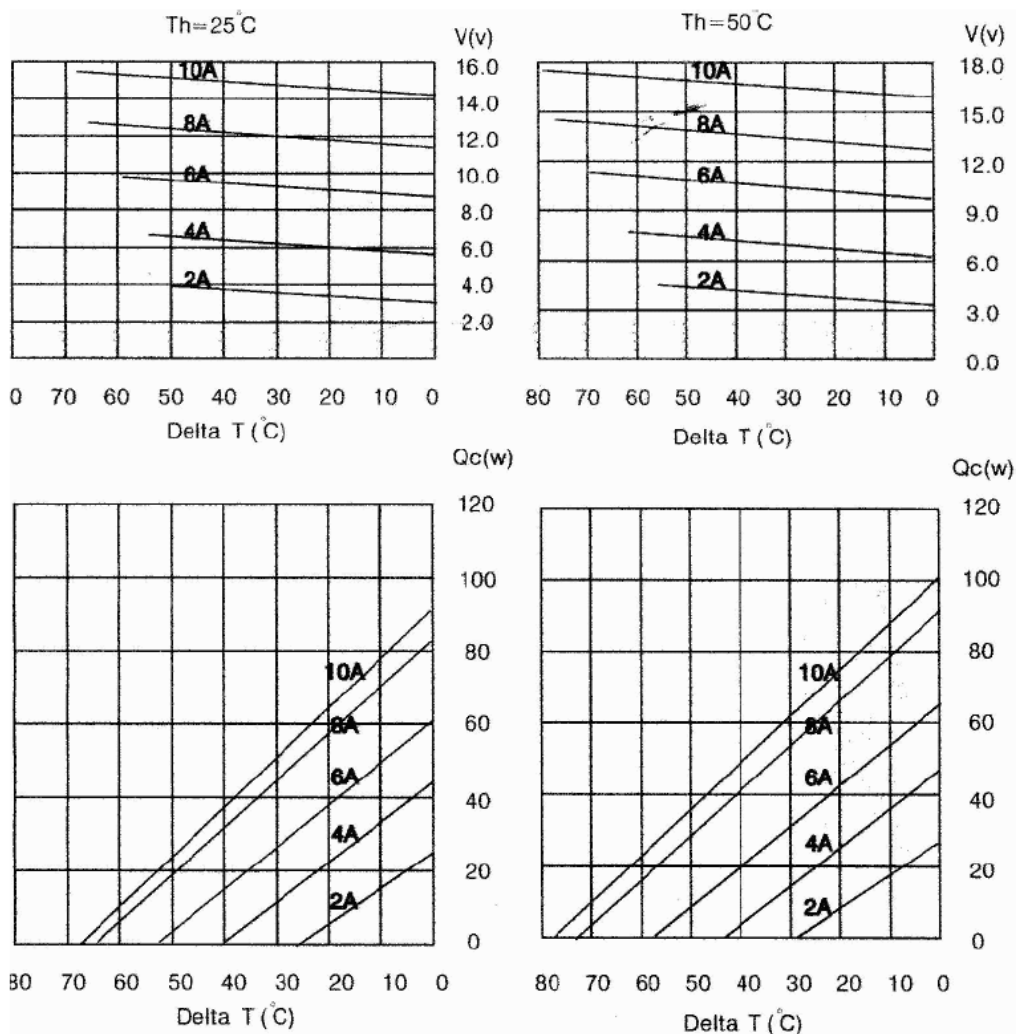
$$2) - \frac{\frac{T_{air} - T_{hsc}}{R_{hsc}} - \frac{T_a - T_{air}}{R_{iz}} - \frac{T_d - T_{air}}{R_d}}{C_{air}} = \frac{dT_{air}}{dt} \quad (2.10)$$

$$3) - \frac{\frac{T_d - T_{air}}{R_d} - q_D}{C_d} = \frac{dT_d}{dt} \quad (2.11)$$

Po integraci (2.9) dostaneme teplotu vnitřního chladiče. Integrací (2.10) získáme teplotu vzduchu uvnitř komory a integrací (2.11) získáme teplotu zařízení. V simulaci se mezi sebou

rovnice vzájemně propojují aby měly všechny potřebné argumenty, detailně si simulaci ukážeme v kapitole 3.1.

Další část simulace je samotný Peltierův článek. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.3.3. existují rovnice které popisují jeho chování. Toto je samo o sobě velmi složité a přesahuje rámec mé bakalářské práce. Pokoušel jsem se vytvořit fungující model a i když jsem měl méně či více úspěšné pokusy nedokázal jsem získat potřebné informace a nakonec jsem se rozhodl použít jednodušší, ale méně přesnou metodu výpočtu vlastností Peltierova článku. O přesné metodě modelování Peltierova článku se můžete dočíst v odkazu [1]. Učinil jsem tak přepsáním grafů z datasheetu použitého Peltierova článku do podoby rovnic. Grafy ze kterých jsem odvozoval rovnice popisující chování Peltierových článků jsou na Obrázek 3.



Obrázek 3 Grafy popisující chování Peltierova článku [3]

Dva levé grafy reprezentují chování článku při teplotě teplé strany $T_h = 25^\circ\text{C}$ pravé ukazují chování článku při $T_h = 50^\circ\text{C}$. Při pokusech na reálné soustavě (za pokojové teploty) se teplota T_h pohybuje kolem 35°C , proto jsem musel rovnice odvozovat z grafu, který vznikl interpolací výše uvedených grafů. Z prvního grafu jsem schopen získat proud, který bude protékat článkem při různých teplotních rozdílech teplé a studené strany. Ze spodního grafu jsem schopen vyčíst chladičový výkon který je článek schopen dodat. Odvozené rovnice mají následující tvar.

$$I = \frac{V + \frac{1}{50} \Delta T}{1,5} [A] \quad (2.12)$$

$$Q_c = \frac{15}{11} \Delta T + 10 I [W] \quad (2.13)$$

Pro úplnou přesnost je ještě potřeba vzít v úvahu Seebeckův efekt, který vytváří napětí mezi elektrodami Peltierova článku z důvodu různých teplot stran Peltierova článku. Rovnice je zahrnuta v simulaci a je popsána u Obrázek 7.

$$U = \Delta T \cdot S \quad (2.14)$$

ΔT značí teplotní diferenciál a S je Seebeckův koeficient.

2.5 Řízení

Řízení a kontrola teplot bude probíhat na dotykovém display uLCD-35DT, který bude přímo zprostředkovávat komunikaci mezi obsluhou a zařízením. Uživatel bude mít možnost vybrat si mezi více druhy kontroly teplot (stacionární teplota, oscilující teplota). Může si zvolit teplotu s vyšší prioritou, to znamená, že se teplota uvnitř komory bude řídit podle teploty vzduchu uvnitř komory, nebo podle teploty zařízení. Na displeji může obsluha také sledovat graf průběhu všech teplot, nebo okamžité teploty všech čidel.

Teploty se budou snímat pomocí čidel DALLAS18B20. Čidlo má rozsah měřitelných teplot od -55°C do 125°C . Podle mého názoru je jejich největší výhodou fakt, že si čidlo samo převádí teplotu a my přijímáme již číselnou hodnotu. Komunikace s čidlem probíhá přes I2C.

Peltierovy moduly se budou ovládat pomocí výkonového H můstku který je dostupný v Mechlabu jako diplomová práce Josefa Vejlušky [4].

2.6 Regulace

Pro regulaci bude použit PI regulátor, absence D složky je zdůvodněna velmi pomalými změnami teplot. Z pokusů se ukázalo, že model v Simulinku odpovídá reálnému zařízení velmi přesně a proto budu moci použít konstanty získané v simulaci pro reálný regulátor.

2.7 Plug&Go

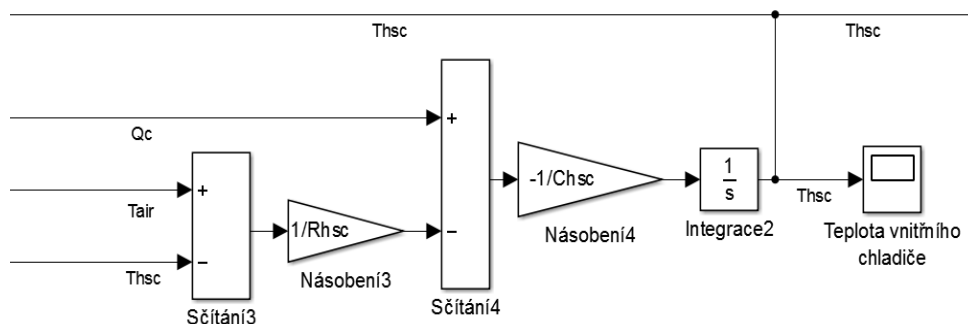
Plug&Go značí schopnost zařízení pracovat ihned po připojení do elektrické sítě bez potřeby připojovat externí zařízení nebo složitého nastavování. Toho jsem chtěl docílit sestavením tvrdé nosné konstrukce, která by sloužila jako ochrana pro měkký izolační materiál, ale také jako plocha na kterou se budou dát připevnit všechny potřebné externí součásti. Důvod proč jsem chtěl takovou vlastnost je ten, aby bylo příjemné zařízení používat. Pokud se mi to podaří tak se bude komora používat často a moje práce na ní bude mít smysl a význam.

3 Praktické řešení

3.1 Simulace

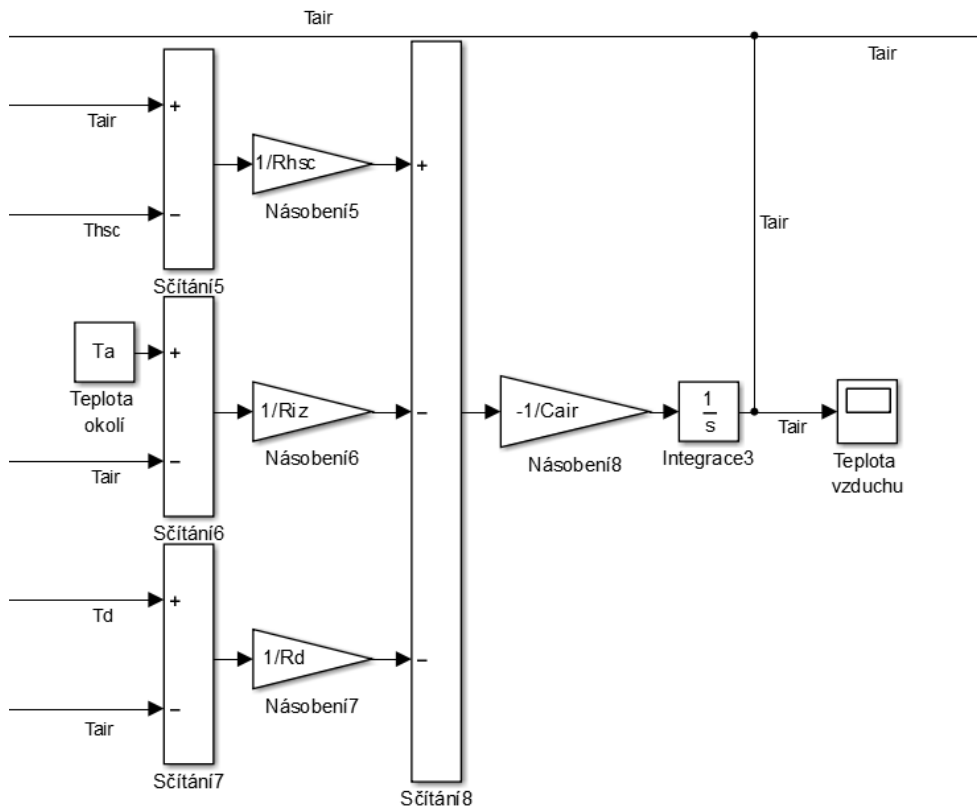
Simulace měla jediný účel a to určit jaký Peltierův článek vybrat. Celá simulace se je z teorie probrané v kapitole 2.5. Aby byla simulace co nejvíce flexibilní a v případě jakékoliv změny se dala tato bez velkých problémů implementovat jsem první vytvořil `Tepelna_komora_data.m` file, ve kterém jsou všechny potřebné výpočty jako je obsah plochy izolačního materiálu, jeho tepelný odpor, vlastnosti vnitřního chladiče, pouzdra chlazeného zařízení, vzduchu uvnitř komory atd. Pokud bude potřeba upravit velikost komory jen se přepíše konstanta a simulace se aktualizuje.

Všechny rovnice z kapitoly 2.5 jsem pak vytvářel již v Simulinku. Jednotlivé části jsou popsány níže.



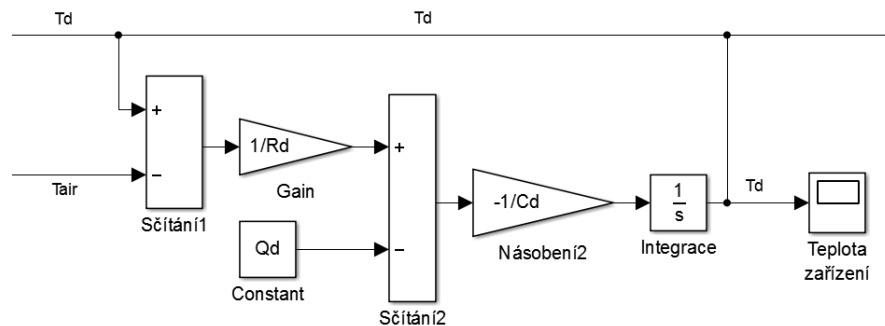
Obrázek 4 (2.9) přepsaná do prostředí Simulinku

Vizualizace rovnice (2.9) ze které vypočítáme Th_{sc} tedy teplotu vnitřního chladiče.



Obrázek 5 (2.10) přepsaná do prostředí Simulinku

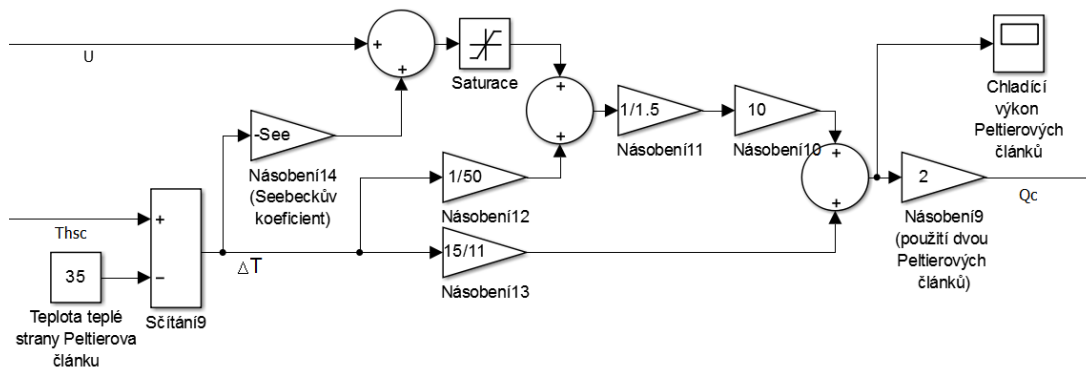
Vizualizace (2.10) ze které vypočítáme teplotu vzduchu uvnitř komory tedy T_{air} .



Obrázek 6 (2.11) přepsaná do prostředí Simulink

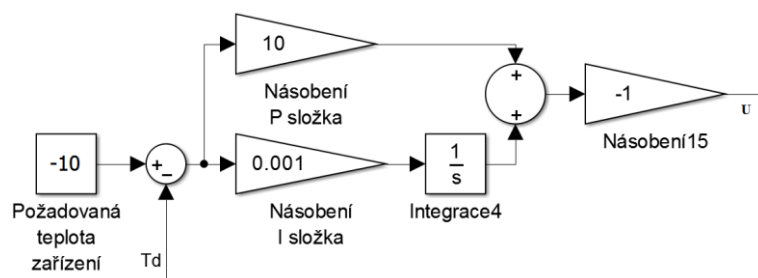
Rovnice (2.11) ze které vypočítáme teplotu zařízení (device) T_d .

Rovnice (2.12) a (2.13) jsou spojeny dohromady, aby se z nich dal vypočítat tepelný výkon Peltierova článku, pro větší přesnost musí být zahrnuta i (2.14) propojení rovnic je vidět na Obrázek 7.



Obrázek 7 rovnice Peltierova článku

Regulátor v PI konfiguraci je předřazený rovnicím na Obrázek 7 a vypadá následovně.



Obrázek 8 PI regulátor tepelné soustavy

Konstanta (-10) je teplota na kterou chceme zařízení vychladit/vyehřát. Teplota T_d je zpětná vazba z rovnice (2.11). Signál U značí potřebné napětí na článku, který pokračuje na Obrázek 7.

3.2 Výběr Peltierova článku

Peltierův článek jsem vybíral na základě výsledků Simulace. Ten, který jsem si vybral na vytvoření rovnic (2.12) a (2.13) jsem si zvolil na základě odhadu a odečtením potřebného

výkonu z grafů. Nakonec se ukázalo, že dva takové články stačí k teoretickému vychlazení komory na -12.4°C .

Články, které jsem si vybral, mají označení TEC1-12710 a vypadají podle Obrázek 9.



Obrázek 9 Peltierův článek s označením TEC1-12710 [3]

Rozhodl jsem se mít dva chladicí moduly hlavně z toho důvodu, že můžu použít menší Peltierovy články a tím pádem i menší chladiče na teplé straně. Už tak je potřeba z každého Peltierova článku odvést přibližně 150W tepelného výkonu a i když jsou počítačové chladiče dělány na ztrátové výkony v rozmezí 200W až 300W akceptovatelná teplota počítačového procesoru je mezi 50°C až 90°C . Pro naše použití je potřeba aby se teplota článku na teplé straně pohybovala v číslech od 30°C do 40°C a to s použitím finančně dostupného chladiče a velkého Peltierova článku nebylo možné. Nakonec se ukázalo, že tato myšlenka byla správná a při pokojové teplotě jsem schopný udržovat teplotu na teplé straně Peltierova článku na 35°C .

3.3 Konstrukce

3.3.1 Izolační materiál

Izolační materiál je velmi důležitý pro projekt, a proto mu byla věnována značná pozornost. Na trhu existuje velká spousta izolačního materiálu, ale ne každý je vhodný pro naši aplikaci. Potřeboval jsem aby měl následující vlastnosti:

- velký tepelný odpor / malou tepelnou vodivost
- aby byl tuhý a dokázal udržet svůj tvar
- důležitá byla také cena a dodávané množství

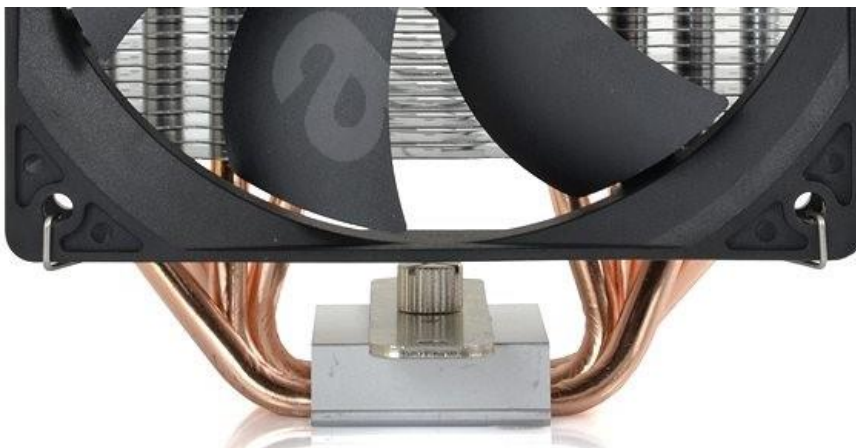
Nejčastěji se izolační materiály používají ve stavebnictví. Po prozkoumání internetu jsem vybral následující dva materiály, které jsem podrobil výběru.

- Spaceloft $\lambda = 0,015[\text{W/m.K}]$
- Extrudovaný polystyren $\lambda = 0,033[\text{W/m.K}]$

Materiál s názvem Spaceloft je v každém technickém ohledu lepší než extrudovaný polystyren. Problémem ovšem byla cena, množství které bych potřeboval na izolaci komory by stálo 2500Kč. Když jsem zkusil porovnat oba dva materiály v simulaci tak výsledek při chlazení byl téměř nepostřehnutelný, velkou nevýhodou polystyrenu je jeho degradace při vysokých teplotách, kterým se budu muset v komoře vyvarovat. Pokud by bylo potřeba, aby komora zvládla vyšší teploty než 80°C musela by se vyměnit vnitřní vrstva za materiál, který takovou teplotu zvládne. Toto zařízení je ale konstruováno především za účelem chlazení a proto není toto omezení kritické.

S vedoucím práce jsme se domluvili, že ideální šířka izolační vrstvy bude 5cm. K dispozici byl však materiál pouze tloušťky 3cm, proto byly jednotlivé kusy spojovány a překládány tak,

aby se nikdy nepotkaly dvě mezery nad sebou. Nakonec jsem při sestavování celé komory dohromady zjistil, že největší problém bude místo, kde bude umístěn Peltierův článek. Problém je takový, že celé spojení vnitřního chladiče, Peltierova článku a venkovního chladiče je velmi nepraktické co se tvaru týče a je hodně složité tento spoj kvalitně odizolovat a vzduchově co nejvíc utěsnit a to hlavně kvůli teplovodivým trubkám na venkovním chladiči jak můžete vidět na obrázku níže.

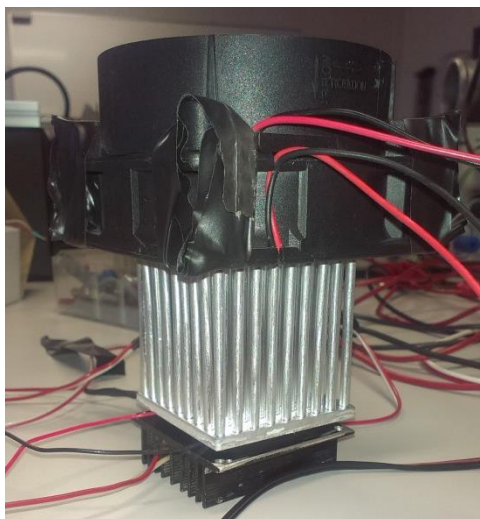


Obrázek 10 Detail venkovního chladiče [5]

Problém jsem vyřešil upravením otvoru v nosné konstrukci a místa průchodu do komory. Z důvodu přenosu tepla jsem použili plastové šrouby které přitlačují vnitřní chladič na Peltierův článek pro lepší kontakt a zároveň jsou použity pro připevnění celého chladičského elementu na stěnu nosné konstrukce.

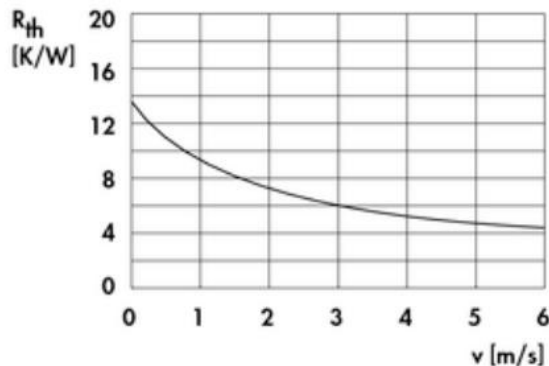
3.3.2 Chlazení

První pokus co jsem s Peltierovým článkem udělal byl takový, že jsem ho vložil mezi dva pasivní chladiče a pustil do něj proud. Ze začátku zařízení minimálně chladilo ale po chvíli se začaly oba dva chladiče zahřívat. Hned jsem pochopil jaké budou u tohoto zařízení výzvy. Pokud chceme aby chladič efekt na studené straně Peltierova článku byl co nejsilnější, musíme zajistit nejlepší možné chlazení na jeho teplé straně. Při prvních pokusech s Peltierovým článkem kdy jsem se seznamoval se zařízením a snažil se pochopit jak funguje jsem byl schopný dosáhnout nejnižších teplot přibližně $+10^{\circ}\text{C}$. Při dalších pokusech jsem používal pasivní chladiče s PC větráky, jak je zobrazeno na Obrázek 11.



Obrázek 11 Primitivní sestava na seznámení se s funkcí Peltierova článku

Tato sestava mi umožnila pochopit jak Peltierův článek funguje, jeho chování a především důležitost odvodu tepla ze zahříváné strany. Jak moje pokusy postupovaly tak jsem experimentoval s různým umístění větráků, jejich skládání na sebe, jak je vidět na obrázku, čímž jsem dosáhl rychlejšího proudění vzduchu. Ze závislosti tepelného odporu na rychlosti proudění vzduchu zobrazené na Obrázek 12 a z provedených pokusů jsem pochopil, že budu potřeboval aktivní chladiče.



Obrázek 12 Tepelný odpor vs. rychlost proudění vzduchu [6]

Po tom co jsem si tyto základní skutečnosti uvědomil jsem byl schopný dosáhnout teplot kolem -5°C . Pochopil jsem, že chlazení Peltierova článku bude kritické pro celkovou funkci tepelné komory a dosažitelných teplotních limitů. Nejlepším řešením bude chlazení co se používá v počítačích na CPU. Při chlazení CPU v počítači se řeší v podstatě úplně stejný problém, kdy se z malého čipu o rozměrech 40x40mm snaží odvést tepelný výkon pohybující se ve stovkách wattů. Při řešení otázky jaké chlazení teda použít jsem byl jednoznačně pro použití vodního chlazení, bohužel z důvodů finančních prostředků jsem byl donucen použít standartní věžové chladiče.

Důvodů proč jsem chtěl použít vodní chlazení je hned několik:

- díky vlastnostem vody je vodní chlazení účinnější než vzduchové
- samotný chladicí blok je obdélníkového průřezu a proto by šel lehce izolovat

Pochopitelně má vodní chlazení i nevýhody oproti vzduchovému chlazení:

- vyšší cena
- celý systém je složitější a tedy náchylnější na závady (vodní pumpa, těsnost spojů)

Po otestování vybraného chladiče s Peltierovým článkem který jsem se rozhodl použít bylo zjištěno, že jsou dostačující. Případná PUSH/PULL kombinace větráků kdy jeden větrák vzduch vhání a druhý vytahuje z žeber chladiče by ještě zvýšila účinnost chlazení.

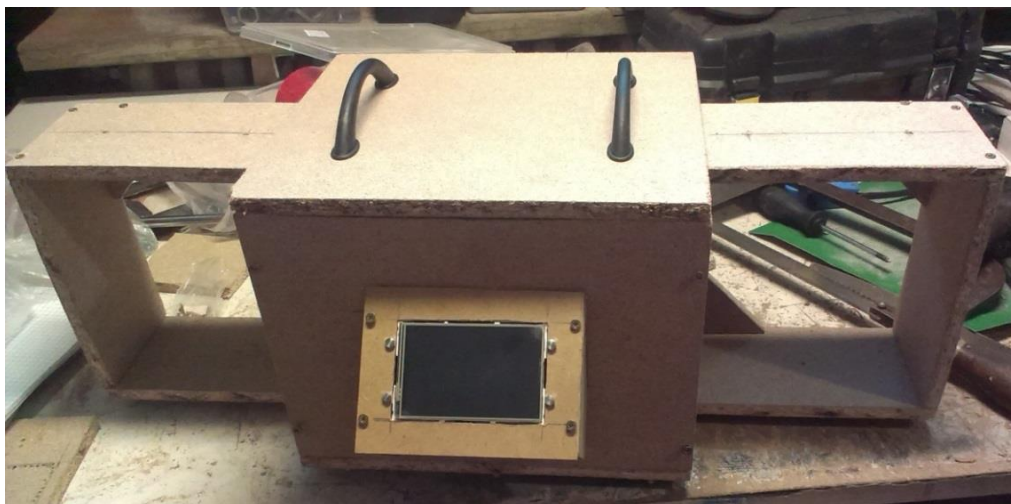
Note: Při studování chladičů jsem na internetu objevil video, ve kterém nadšenec na PC tuning napojil na vodní chlazení přibližně 32 větráků ve zmíněné PUSH/PULL konfiguraci a dosáhl teplot nižších než 0°C v prostředí kde teplota okolního vzduchu byla 25°C.

3.3.3 Nosná konstrukce z dřevotřísky

Jak již bylo zmíněno, chtěl jsem aby zařízení bylo Plug&Go, tedy připravené pracovat bez složitého chystání. To zahrnuje i fakt, že musí být všechny součásti pohromadě a lehce přenositelné. Dalším důvodem proč jsem se rozhodl udělat nosnou konstrukci byl ten, že izolační materiál který je použit je křehký a měkký což by absolutně znemožnilo připevnění jakýchkoliv vnějších zařízení jako je těžký zdroj, ovládací display, chladiče atd.

Nabízelo se spoustu možností jak takovou nosnou konstrukci vytvořit. Například by se dal použít plastový kontejner. Toto řešení by mě ale výrazně omezovalo v tvaru samotné komory a najít plastový odlitek který splní všechny moje požadavky je tak časově náročné že jsem se na základě zkušeností z předchozích projektů rozhodl si nosnou konstrukci postavit sám přesně na míru.

První bylo důležité si určit jak velká celá konstrukce bude. Postupoval jsem zevnitř komory směrem ven, měl jsem daný vnitřní objem 1L a rozměry koupeného vnitřního chladiče. Kolem nich jsem z každé strany nechal malé mezery kterými může proudit vzduch a tím se využila celá plocha chladiče k výměně tepla. Z vyšlého průřezu cca 110x80 jsem si dopočítal přibližnou délku dutiny. Od tohoto bodu byly výpočty rozměrů profilů pouhým matematickým úkolem přičtení šířky izolační plochy k již zjištěným vnitřním rozměrům a narýsování profilů na desku které jsem potom vyřízl. V průběhu designu konstrukce jsem se rozhodl přidat chrániče na venkovní chladiče a namontovat držadla, která přispívají k celkové mobilitě zařízení. Pak jen zbývalo doplnit detaily jako gumové nožičky a montovací plošinku na řídicí display aby k němu byl dobrý přístup a zároveň dobrá viditelnost.



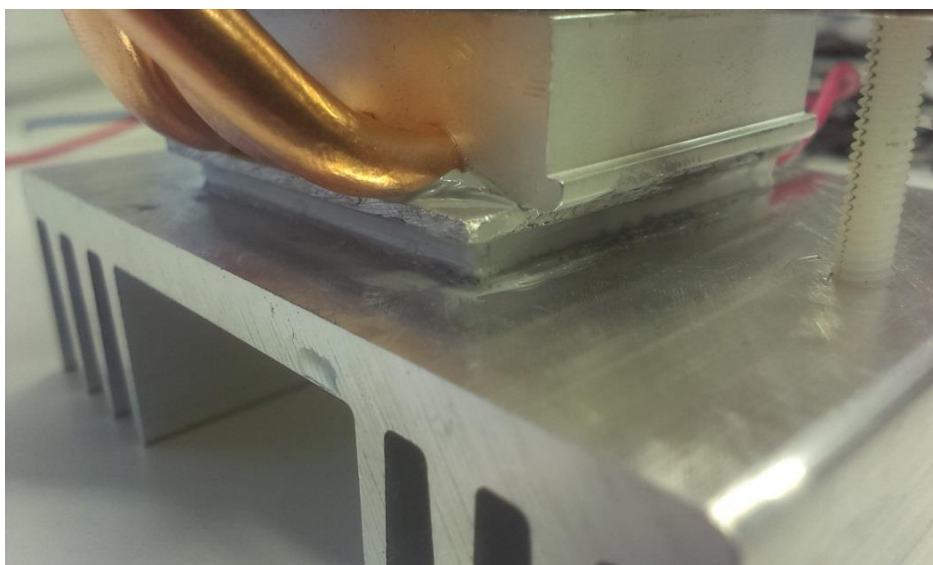
Obrázek 13 Nosná konstrukce

3.3.4 Spojení a instalace Peltierových článků a chladičů

Pro nejlepší tepelnou výměnu musí mít chladič malý tepelný odpor. Venkovní PC chladič dosahuje takových vlastností kombinací tepelných trubek „heat pipe“ a jemného žebrování. Pro vnitřní chladič jsme se rozhodli použít hliníkový profil, o rozměrech 90x60x20mm.

Vnitřní chladič byl do sestavy přidán za účelem zlepšení výměny tepla mezi vnitřním prostorem komory a chladnou stranou Peltierova článku. To je možné díky jeho velké ploše a materiálu s velmi nízkým tepelným odporem a malou tepelnou kapacitou. Pro větší efektivitu tohoto jevu jsem vložili do vnitřního prostoru komory malý větráček který má za úkol rozhýbat vzduch uvnitř komory a tím podle Obrázek 5 zlepšit teplotní přestup mezi jednotlivými prvky. Prakticky pojede vnitřní větráček jen ze začátku teplotního cyklu, kdy je jeho přínos největší, při malém rozdílu požadované a aktuální teploty bude vypnutý aby zbytečně neohříval okolní prostředí svými ztrátami.

Aby se tepelná energie mezi Peltierovým článkem a chladiči přenášela co nejlépe, musí mít také kontakt mezi těmito součástkami nejmenší možný tepelný odpor. Tento fakt můžeme vyčíst již z části o tepelných soustavách. Stejně jak v elektronice se sériově řazené rezistory sčítají tak je tomu i u teplotních soustav.



Obrázek 14 Spojení počítačového chladiče-Peltierova článku-vnitřního chladiče

Aby bylo dosaženo přechodu s co nejmenším tepelným odporem musí být zajištěna největší možná plocha styku chladiče a Peltierova článku. Toho je dosaženo následujícími způsoby:

Využití celé plochy chladiče a Peltierova článku

Protože je použit chladič který je primárně určen k chlazení počítačových procesorů, nemají ideální tvar pro naši aplikaci. Zatímco počítačový procesor má zdroj tepelného výkonu uprostřed těla jak můžete vidět na obrázku níže.



Obrázek 15 Pohled na zdroje tepla v počítačovém procesoru [7]

Peltierův článek vytváří tepelný tok na celém jeho povrchu. Proto jsem vyřezal čtvercový kus hliníku o kousek větší než je rozměr Peltierova článku který používám. Hliník má malou tepelnou kapacitu a velkou tepelnou vodivost. Vložením takového kusu kovu mezi Peltierův článek a chladič jsem docílil toho, že i přesahující části Peltierova článku budou chlazeny a nebudou se přehřívat.

Stykové plochy

Pokud na sebe budou dosedat dvě konkávní nebo konvexní plochy tak budou mít menší stykovou plochu. Proto jsem musel srovnávat dotykovou plochu počítačového chladiče, která byla nerovná především kvůli přítomnosti tepelných trubek. Provedl jsem velmi jemné zbrusnění přebytečného hliníku pomocí ručního pilníku a brusného papíru.

Teplovodivá pasta

Pokaždé se stane, že povrchy nejsou ideálně hladké a nejsou přesně rovné. Malé nerovnosti můžeme eliminovat použitím teplovodivé pasty, která se rozprostře pod celou kontaktní plochu a zajistí kvalitní styk. Použitá pasta má označení „Pactup PT-1“.

Tlak na spojích

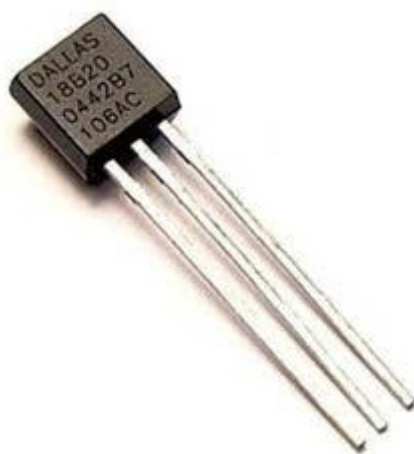
Při aplikování tlaku na jednotlivé plochy se zmenšuje tepelný odpor přechodu. Na stáhnutí celého chladičového modulu jsem použil plastové závitové tyče které nebudou převádět tepelnou energii. Spojení je vidět na Obrázek 7.

Při sestavování celého modulu jsem vždy první nanesl teplovodivou pastu a rozetřel jsem ji tak, aby vytvořila tenkou vrstvu. Když byla pasta tuhá tak jsem ji zahřál horkovzdušnou pistolí aby se dala lépe nanášet. Při stahování pomocí závitových tyčí jsem vytvořil závity ve vnitřním chladiči, poskládal všechny vrstvy na sebe a střídavě utahoval levý a pravý závit aby byl tlak na Peltierův článek rozložený na obě strany stejně.

Při samotné instalaci na nosnou konstrukci nastal již zmíněný problém s izolací prostoru průchodu, který jsem řešil tak, že jsem vyřezával malé kousky izolačního materiálu, které jsem skládal na místa, kde by jinak vnikla vzduchová dutina. Celý modul drží na nosné konstrukci pomocí závitových tyčí, na které jsem přidal jednu matku a podložku z vnitřní strany.

3.3.5 Čidla teploty

Celá tepelná komora obsahuje 4 teplotní senzory DALLAS 18B20.



Obrázek 16 Teplotní senzor DALLAS 18B20 [8]

Jsou rozmístěny tak že snímají:

- teplotu okolí
- teplotu vzduchu uvnitř komory
- teplotu vnitřního chladiče
- teplotu zařízení uvnitř komory

Teplota okolí má spíše informativní hodnotu pro uživatele.

Senzor na vnitřním chladiči bude zajišťovat aby se nepřekročila maximální dovolená teplota, která by způsobila degradaci izolační vrstvy. Maximální teplota je 80°C.

Senzory teploty zařízení a vzduchu budou použity pro řízení. Uživatel má možnost si vybrat prioritní teplotu. To znamená, že pokud chci simulovat stav, kdy je zařízení v prostředí kde je 0°C nastavím jako prioritní teplotu vzduchu. Pokud potřebuji vyzkoušet jak se bude zařízení chovat když bude jeho teplota 0°C bude se regulátor řídit podle teploty na čidle, které je připevněné na testovaném zařízení. To znamená, že teplota vzduchu může být i nižší než je 0°C.

Čidla jsou umístěna tak, aby měla co největší styčnou plochu s předmětem který měří a minimální s okolím.

3.4 Výkonová a napájecí část

3.4.1 Zdroje napětí

Na komoře jsou celkem tři zdroje rozdílných napětí, je to 24V/12V/5V. Výkony každého zdroje se hodně liší a jejich použití také. Vše je popsáno v této kapitole.

Zdroj 24V

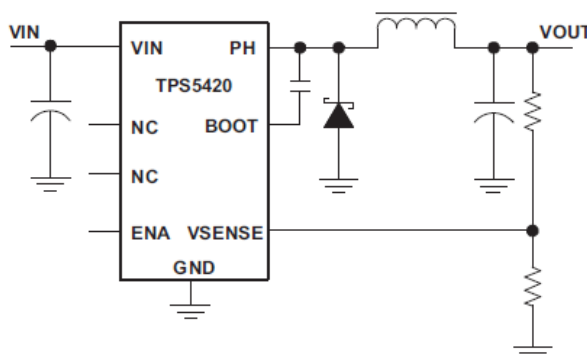
Tento zdroj je výkonový zdroj celého zařízení a je připojený přímo na síť 230V. Jedná se o spínaný zdroj s názvem **MEAN WELL RSP-320-24**. Jeho parametry jsou následující:

- Výkon: 321W
- Výstupní napětí: 24V DC
- Výstupní proud: 13,4 A
- Napájecí napětí: 230V/50Hz
- Účinnost: 89%

Proč jsem vybral zdroj s takovými vlastnostmi ujasním v kapitole 3.4.2.

Zdroj 12V & 5V

Zdroj 12V potřebuji pro napájení větráků vnějších počítačových chladičů které se starají o odvádění tepla z Peltierova článku. Zdroj bude použitý i pro napájení vnitřního ventilátoru který slouží k cirkulaci vzduchu uvnitř komory. K výrobě jsem použil předlohu zdroje, který již byl v Mechlabu jednou vyráběný a předělal jsem ho k obrazu svému. Je použit integrovaný obvod s názvem TPS5420. Je to spínaný step down zdroj (dokáže snížit napětí z 24V na požadovanou hodnotu s velmi vysokou efektivitou) s fixní spínací frekvencí 500kHz, může poskytovat až 2A souvislého proudu, efektivita je 90%, výstupní napětí je nastavitelné od 1.22V až po napájecí napětí. Pro správnou funkčnost je potřeba pouze 7 externích součástek. Základní zapojení je na Obrázek 17.



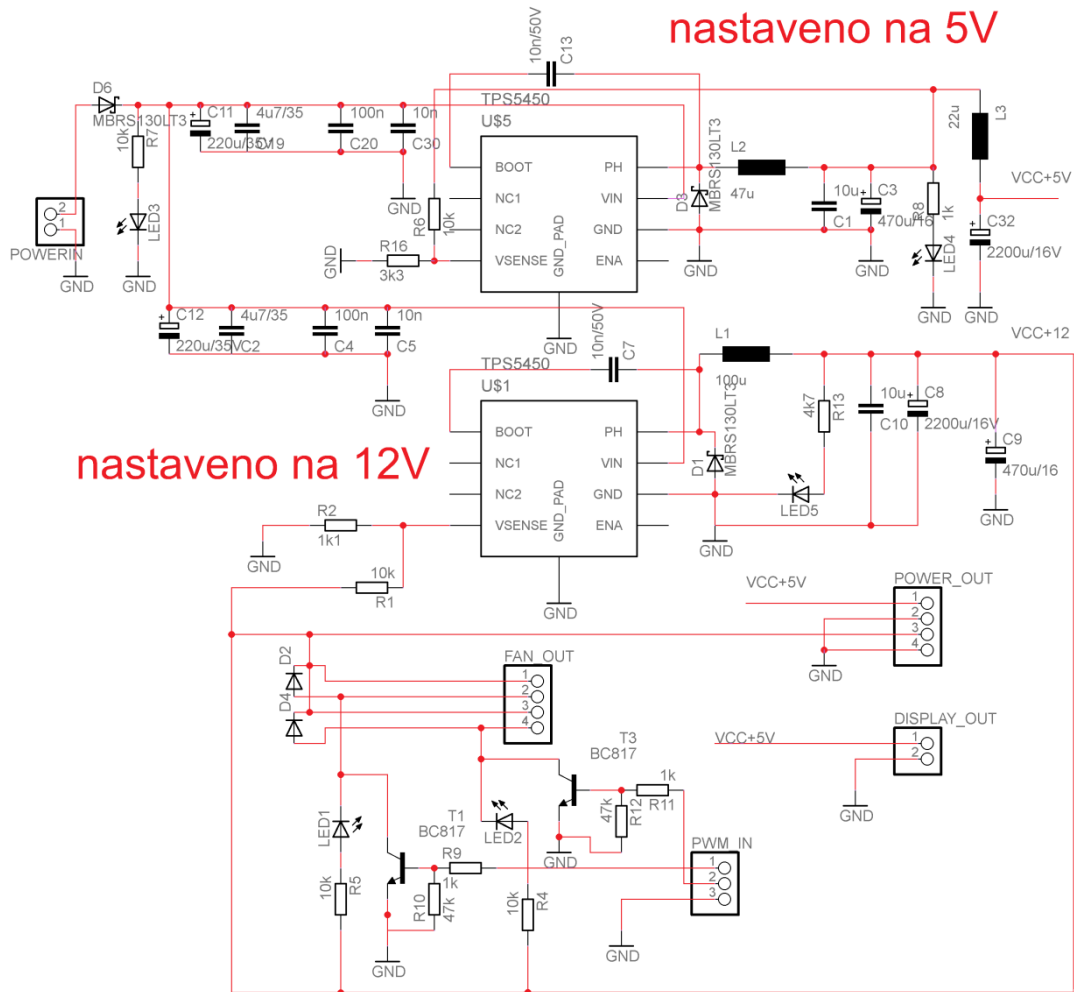
Obrázek 17 Základní zapojení IO spínaného zdroje TPS5420 [9]

Všechny tři větráky budou mít odběr maximálně 0,5A takže výkonově je zdroj dostatečný. Stejný IC se bude používat i pro zdroj 5V který napájí ovládací display, tento zdroj má ještě jeden RC filtr pro zajištění čistého napětí a tím i eliminaci možných chyb vlivem zvlnění napájecího napětí. Oba dva obvody, jak pro 12V tak pro 5V jsou na jedné DPS. Deska má i další vlastnosti jako:

- ochranu proti přepólování
- LED indikátory 5V & 12V & 24V

- dva nezávislé obvody s NPN tranzistory pro spínání 12V (ventilátory)
- LED indikátor sepnutého tranzistoru

LED indikátory jsou pouze z důvodu vizuálního ověření funkčnosti. Ovládané NPN tranzistory jsou z toho důvodu, že větráky není potřeba napájet po celou dobu připojení zdroje na síť, ale pouze v případě potřeby chlazení. Ventilátory na venkovních chladičích Peltierova článku pojedou jen v případě že bude zařízení chladit/hřát. Vnitřní větráček pojedou jen v případě, že je aktuální teplota uvnitř komory a teplota žádaná hodně rozdílná, aby prouděním vzduchu uvnitř komory zlepšili tepelnou výměnu mezi vnitřními chladiči a vzduchem. Pokud bude teplotní rozdíl malý, ventilátorek se vypne, aby svými ztrátami nezahřival vnitřek komory.



Obrázek 18 Schéma spínaných zdrojů

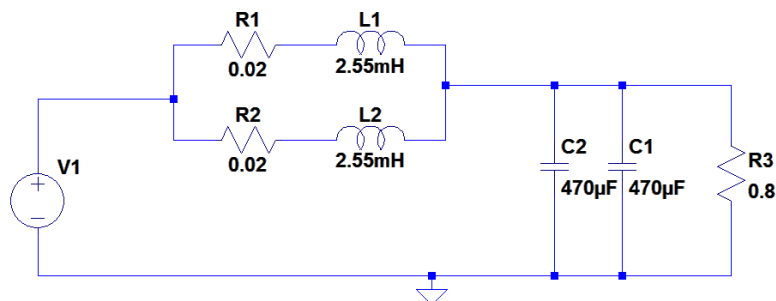
3.4.2 Řízení výkonu Peltierova článku

Výkon článku se bude řídit H-můstkem, který se ovládá z displeje.

Ovládání můstku je velmi jednoduché pomocí tří pinů.

- DIR (ang. direction) kontroluje polaritu výstupu
- DIS (ang. disable) pokud je na pinu log. 1 celý můstek se deaktivuje
- PWM (ang. Pulse Width Modulation) signál může mít střihu 0 – 98% (je velmi nepravděpodobné že by střida 98% vznikla chybou, u střidy 100% je to možné => bezpečnostní opatření)

Po zkušebním testu jsme usoudili, že se budou muset tranzistory H můstku chladit, proto jsem celou desku připevnil za ventilátory sloužící ke chlazení Peltierových modulů. Protože Peltierův článek nemůže být napájen obdélníkovými pulzy musí se výstup z H můstku filtrovat. Byl navržen LC filtr, viz schéma a hodnoty na Obrázek 19.



Obrázek 19 schéma a hodnoty LC filtru

Odpory R1 a R2 reprezentují činný odpor cívek. Cívky jsou použity paralelně aby zvládly proud 20A. Odpor R3 reprezentuje dva paralelně připojené Peltierovy články. Rezonanční frekvence filtru je

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1.275mH \cdot 940uF}} = 145.4Hz \quad (3.1)$$

a frekvence PWM je 70kHz z porovnání plyne robustnost filtru a neschopnost rozkmitání. Při provedení simulace bylo zvlnění proudu menší než 1mA tedy zanedbatelné. Filtr je vyrobený ze součástek které byly v laboratoři k dispozici, proto jsou větší než je potřeba. To nám ale zajišťuje nejlepší životnost Peltierových článků. Provozní hodnoty vybraného Peltierova článku jsou podle Tabulka 3.

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

Tabulka 3 Vlastnosti Peltierova článku s označením TEC1-12710 [1]

Jak můžeme vidět, tak je článek na napětí 16V (při uvažování teploty teplé strany 35°C). Proto musíme použít H-můstek který funguje jako STEP-DOWN konvertor a dokáže snížit 24V které má k dispozici ze zdroje a vytvořit nastavitelné napětí od 0V do 16V a zároveň ve stejném poměru zvýšit proud. Pokud tedy máme napájecí napětí 24V a článek je na 16V PWM signál nesmí mít střidu větší než S_{MAX}.

$$S_{MAX} = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{16}{24} = 0,66 \quad (3.2)$$

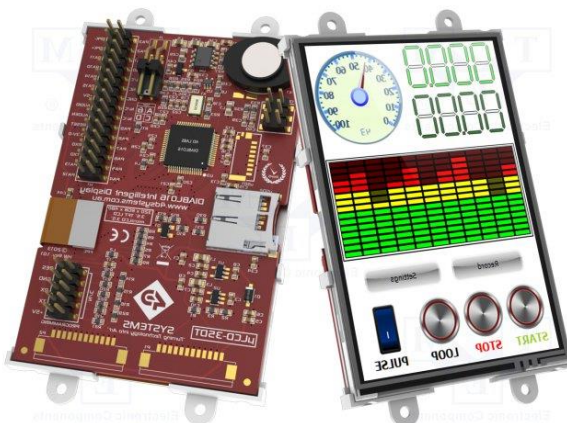
Tabulka nám dále říká maximální chladicí výkon ve wattech, tato hodnota je platná pouze při nulovém rozdílu teplot jednotlivých stran článku. Maximální teplotní rozdíl, který je článek schopný vytvořit při nulové teplotní zátěži na studené straně a teplou stranou chlazenou na 25°C resp. 50°C. Maximální proud se odvíjí od odporu článku a přiloženém napětí.

Řízení je realizováno změnou střídý řídicího PWM signálu a polaritou napětí. Celý proces je zcela automatický a uživatel zadá pouze požadovanou teplotu nebo cyklus. Automaticky se budou také vypínat a zapínat ventilátory sloužící k chlazení Peltierových článků a vnitřní ventilátorek sloužící k urychlení tepelné výměny uvnitř komory.

3.5 Display & teplotní čidla

3.5.1 Vlastnosti a popis displeje

Na tepelné komoře je použit dotykový display od firmy „4D Systems“, použitý model má označení μ LCD-35DT. Displej má úhlopříčku 3.5“ která poskytuje dostatečný prostor pro naši aplikaci, rozlišení je 480x320 pixelů a dotyková funkce je zprostředkována rezistivní technologií. Tato technologie má horší vlastnosti co se citlivosti týče, ale její výhodou je cena a schopnost ovládat displej tužkou nebo stylusem. Na komoře bude displej použitý v režimu LANDSCAPE tedy naležato. Můžeme použít až 16 I/O pinů které mají i další vlastnosti o kterých si povíme níže. Samotný mikročip který celý displej obsluhuje dokáže uložit pouze program a grafické soubory se musí ukládat odděleně na microSD kartu. Stačí 4GB.



Obrázek 20 Použitý displej μ LCD-35DT [10]

3.5.2 Programování displeje

Firma 4D Systems má vlastní programovací jazyk, který je hodně podobný na C a C++, při znalosti jednoho z nich pro vás bude programování jednodušší. K dispozici jsou seznamy příkazů ve formě .pdf souborů, zdarma stáhnutelných[10] ke každému procesoru který se používá. Programuje se v prostředí programu 4D Workshop. Prostředí samotné je velice přehledné a během pár minut se seznámíte s jeho funkcemi. Důvodem proč byl použit tento displej je to, že má jednoduchou implementaci grafiky do běhu programu. Na displeji si můžete grafiku vykreslovat sami pomocí příkazů, nebo můžete použít předem vytvořené obrázky. U takových obrázků se jedná především o tlačítka, přepínače, digitální číslice, různá měřidla, posuvníky, klávesnici atd. Vytvořené knihovny jsou bohaté na svůj obsah a program umožňuje i upravování každé barvy. Nevýhodou je, že k těmto funkcím jsem nenašel žádnou kvalitní dokumentaci a všechno jsem musel složitě hledat na internetu. Nakonec jsem si raději

naprogramoval vlastní graf pro zobrazení průběhů teplot než abych se snažil pochopit již vytvoření.

3.5.3 Klady / Zápory použitého displeje

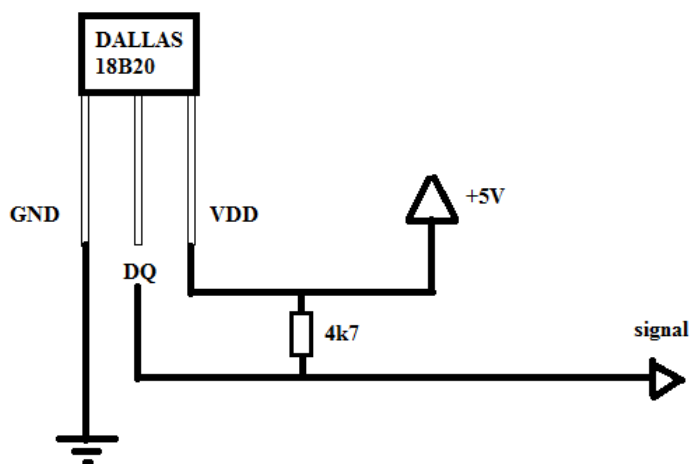
Jako kladnou vlastnost vidím možnost přímé práce s grafikou, která je jednoduchá a vyžaduje pouze napsání souřadnic a barvy. Na druhou stranu je použití některých implementovaných grafických funkcí (digitální číslice, graf) složité a jak jsem již zmiňoval, tak jsem nedokázal najít podklady k těmto funkcím. Programovací prostředí samo mění barvy textu aby byl kód přehlednější, ale neumí automaticky odsazovat řádky a velmi často se mi stávalo, že se obrazovka posunula o padesát řádků mimo kurzor. Jsou to drobnosti, ale velmi nepříjemné a při práci hodně zdržují. Z pohledu uživatele je pro mě také velmi zásadní, že nejsou podporována desetinná čísla, pokud tedy chcete používat desetinná čísla, budete muset použít násobení a modulo. Poslední velkou nevýhodu displeje vidím v tom, že jeho výpočetní síla je velice slabá, to může při složitém programu vést k chybám ve výpočtech a chybách v grafickém zobrazení. Velkou výhodou tohoto displeje je 16 nezávislých pinů, které můžou fungovat jako vstupy, výstupy, nebo se můžou připojit na další vnitřní periferie které procesor umí. Pro nás nejdůležitější jsou PWM kanály a piny schopné komunikovat s čidly teplot.

3.5.4 Vhodnost displeje pro aplikaci na tepelné komoře

Pro naši aplikaci je displej velice vhodný z důvodů, že slouží jako perfektní komunikační rozhraní pro uživatele. Také jeho programovatelné výstupy jsou nezbytné pro jednoduché propojení více zařízení.

3.5.5 Čidla

Zapojení čidel je podle Obrázek 21.



Obrázek 21 Zapojení čidla DALLAS 18B20

Komunikace s čidlem je vždy stejná a postupuje podle následujícího sledu. První se vyšle signál reset, kterým se zařízení dává najevo, že s ním chceme provádět komunikaci a pokud je zařízení funkční a připojené tak odpoví. Pokud máme takové potvrzení že je zařízení připraveno k použití inicializujeme měření zasláním dvou slov na sběrnici, v našem případě jsou to slova 0xCC a 0x44. Příkazem 0xCC říkáme čidlu že nechceme nastavovat žádná vedlejší nastavení a

slovem 0x44 čidlu řekneme aby začalo měřit teplotu. Po inicializaci musíme počkat minimálně 750ms aby si čip stihl naměřenou teplotu převést do digitálního čísla, které nám potom pošle. Čtení informace z čidla probíhá velmi podobně. Vyšleme signál restartu, potom 0xCC kterým přeskakujeme nastavení a příkazem 0xBE řekneme čidlu, aby nám poslal data. Pak jen přečteme první dvě slova co nám čidlo zašle a již máme informaci o teplotě.

NOTE: U čidla lze nastavovat různá nastavení, pro naši aplikaci ale nejsou potřebná a proto se jimi ani nebudu zabývat. Všechna nastavení jsou popsána v datasheetu který je k dispozici na přiloženém CD.

V programovacím prostředí displeje pak kód pro obsluhu jednoho čidla vypadá následovně (čidlo je připojeno na pinu s názvem PA1):

```
OW_Reset(PA1);  
OW_Write(PA1, 0xcc);  
OW_Write(PA1, 0x44 );  
pause(750);  
OW_Reset(PA1);  
OW_Write(PA1, 0xcc);  
OW_Write(PA1, 0xBE);
```

Obrázek 22 Příklad kódu komunikace s čidlem teploty

3.6 Software

3.6.1 Popis ovládacího programu

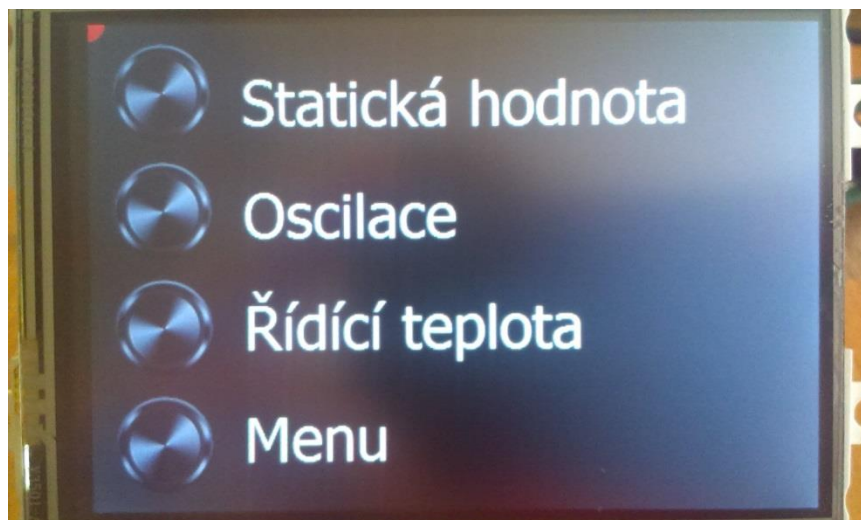
V následující kapitole budou popsány vlastnosti a funkce programu ovládající teplotní komoru.

Úvodní obrazovka vypadá následovně:



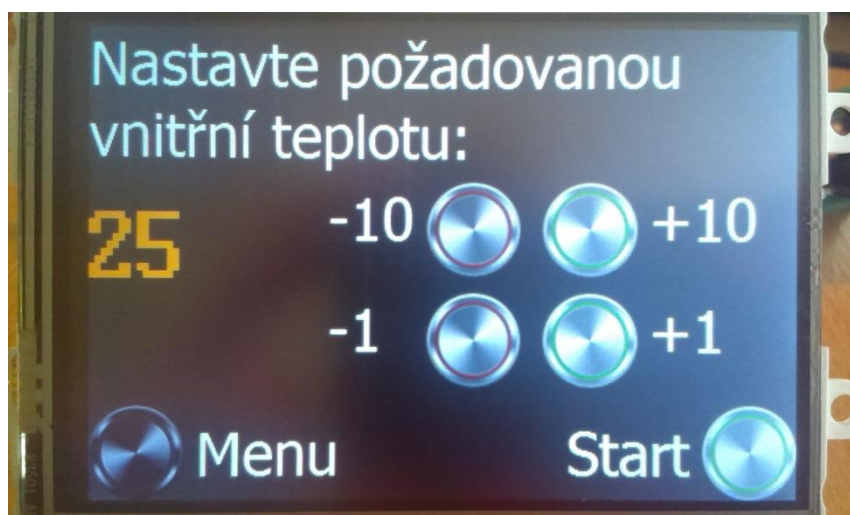
Obrázek 23 Úvodní obrazovka ovládacího programu

Červený čtvrtkruh v levém horním rohu indikuje zapnutí/vypnutí napájení Peltierova článku, slouží k určení stavu bez nutnosti otevírat komoru a kontrolovat dotekem. Tlačítko s názvem „Nastavení teploty“ nás přesune na Obrázek 24.



Obrázek 24 Obrazovka "Nastavení teploty"

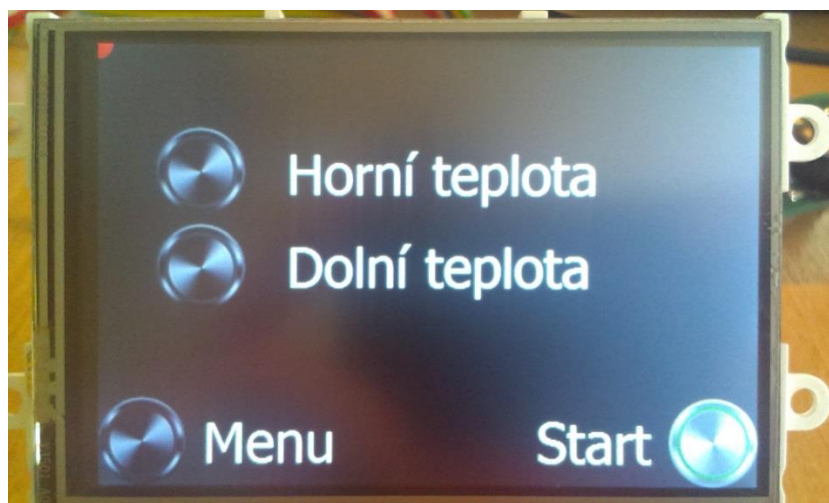
Kde můžeme nastavit jak chceme aby se chladicí komora chovala. Tlačítkem „Statická hodnota“ se dostaneme na Obrázek 25, kde můžeme nastavit teplotu, která bude udržována v komoře. Zvolil jsem použití tlačítek protože se tato metoda ověřila jako nejlepší a nejpřesnější metodou nastavení přesné hodnoty. V levé části obrazovky vidíme nastavenou teplotu, nyní je 25°C. Tlačítkem v pravém spodním rohu „Start“ můžeme odstartovat regulaci teploty uvnitř komory. Tento mód umožňuje pevné nastavení požadované teploty která se nebude měnit. Pokud chceme ještě změnit nastavení, můžeme tak učinit zmáčknutím tlačítka „Menu“ které nás přesune na Obrázek 23, hodnota nastavené teploty zůstane nezměněna.



Obrázek 25 "Statická hodnota"

Pokud na Obrázek 24 stiskneme tlačítko „Oscilace“ přesuneme se na Obrázek 26, kde máme možnost dostat se do nastavení funkce oscilace. Tato funkce nám umožňuje nastavit dvě teploty mezi kterými bude komora přebíhat až do ukončení. Kliknutím na tlačítko „Horní teplota“, nebo

„Dolní teplota“ se dostaneme na stránku velmi podobné té na Obrázek 25, kde nastavíme horní a dolní limitní teplotu.



Obrázek 26 Oscilace

Pokud na Obrázek 24 stiskneme tlačítko „Řídící teplota“ dostaneme se na Obrázek 27. Zde máme možnost nastavit, která z teplot bude prioritní. Pokud bude zvolena „Teplota vzduchu“ simulujeme situaci, kdy je zařízení umístěno v prostředí o takové teplotě, ale teplota zařízení pro nás není důležitá. Ta může být vyšší než teplota vzduchu z důvodu vnitřního zahřívání. Při zvolení možnosti „Teplota objektu“ dáváme najevo, že teplota zařízení musí být přesně řízená. Pochopitelně je to teplota na povrchu zařízení. Tímto nastavením simulujeme situaci kdy potřebujeme zjistit, jak se bude zařízení chovat když dosáhne určité teploty.



Obrázek 27 Řídící teplota

Pokud na Obrázek 23 stiskneme tlačítko „Graf teplot“ máme možnost pozorovat grafické znázornění průběhu teplot jako je na Obrázek 28. Ve spodní části obrazovky máme možnost vidět okamžité teploty všech čidel.



Obrázek 28 Graf teplot (vodorovná osa představuje 429s)

Poslední možností na Obrázek 23 je tlačítko s názvem „Teploty čidel“. Při stisku se dostaneme na Obrázek 29. Funkce této stránky je pouhé zobrazení teplot všech čidel. Čidla jsou vzájemně barevně odlišena, aby se při čtení z grafu nepletla.



Obrázek 29 Teploty čidel

3.6.2 Příklad spuštění

Řekněme že chceme, aby komora udržovala -5°C na povrchu tělesa.

Jako první musíme zapnout zdroj pro komoru a chvíli počkat než se display načte. Ujistíme se že je čidlo na měřeném předmětu správně připevněno a v hlavním menu displeje stiskneme tlačítko „Nastavení teploty“. Na nové stránce vybereme tlačítko „Řídící teplota“ a to nás převede na další stranu kde vybereme „Teplota objektu“. Nyní vybereme „Statická hodnota“ a tlačítka nastavíme teplotu -5°C a zmáčkneme „Start“. V tomto okamžiku je již zahájena regulace teploty uvnitř komory a to si můžeme ověřit malým zeleným čtvrtkruhem v levém horním rohu. Z menu si pak můžeme vybrat sledovat teplotní profil po zmáčknutí „Graf teplot“, nebo jen sledovat teploty jednotlivých čidel po zmáčknutí tlačítka „Teploty čidel“.

4 Zhodnocení výsledků

4.1 Porovnání dosažených hodnot se zadáním BP

Zadání bakalářské práce udává regulovatelný rozsah teplot v rozsahu -5°C až 80°C při teplotě okolí 25°C . Na Obrázek 30 můžete vidět, že minimální teplota vzduchu, čidlo #2, uvnitř komory je -12°C . Čidlo #1 měří teplotu na vnitřním chladiči. Test probíhal se zapnutým vnitřním větrákem, napětí na Peltierových článcích bylo 12V, proud byl přibližně 14A, teplotu okolí měří čidlo #4 tedy 25°C . Při pokusu byly Peltierovy články zapojeny přímo na zdroj napětí, nebyl použit H-můstek.



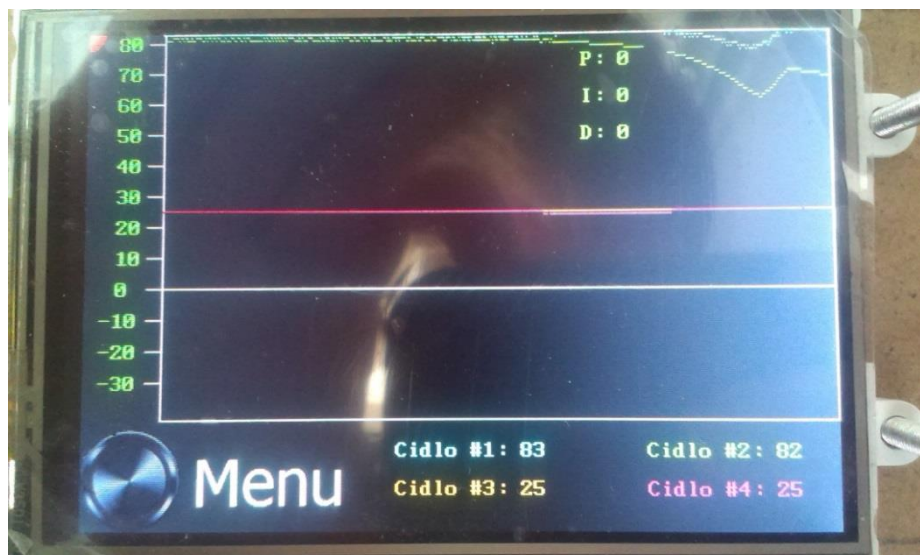
Obrázek 30 Napětí na Peltierových článcích = 12V, ztrátový výkon uvnitř komory = 0W (chlazení)

Při využití plného potenciálu Peltierových článků, tedy napájení 15V se ukázalo, že na takový ztrátový výkon jsou venkovní chladiče již nedostačující. Na Obrázek 31 jsou výsledky takového pokusu. Teplota po ustálení klesla o jeden stupeň, to je při zvětšení napájení o 20% pokles teploty o 2,3%(počítáme-li od 25°C).



Obrázek 31 Napětí na Peltierových článcích = 15V, ztrátový výkon uvnitř komory = 0W (chlazení)

Maximální teploty jsem dosáhl při napětí 8,9V a proudu 6,3A. Průběh teplot je na Obrázek 32. Podle očekávání není žádný problém dosáhnout vysokých teplot, od začátku bylo jasné, že výzvou bude dosažení nízkých teplot a proto je chlazení věnována největší část práce. Jak bylo řečeno je u ohřevu riziko degradace izolační vrstvy a proto se musí při regulaci na 80°C dbát na překmit soustavy, pro zvýšení maximální teploty by se musela upravit izolace. Nesmí se ale překročit maximální dovolená teplota pro Peltierův článek což je 138°C.



Obrázek 32 Napětí 8,9V (vyhřívání)

Posledním bodem bylo ověřit schopnost chlazení při teplotní zátěži 0,5W. Teplotní zátěž jsem vyrobil z odporového drátu, který byl napájen 0,9V a 0,59A ztrátový výkon je tedy 0,53W. Výsledky tohoto testu jsou na Obrázek 33, shodují se i se simulací.



Obrázek 33 Napětí = 12V / ztrátový výkon uvnitř komory = 0,5W

Na dalším obrázku je průběh teplot kdy v komoře nebyl vložený větráček, pak jsem komoru otevřel a vnitřní teplota se zvýšila a následně jsem komoru zavřel s běžícím větráčkem uvnitř (v levé části grafu jsou nejnovější data). Jde vidět, že v části kdy je uvnitř komory větráček (levá

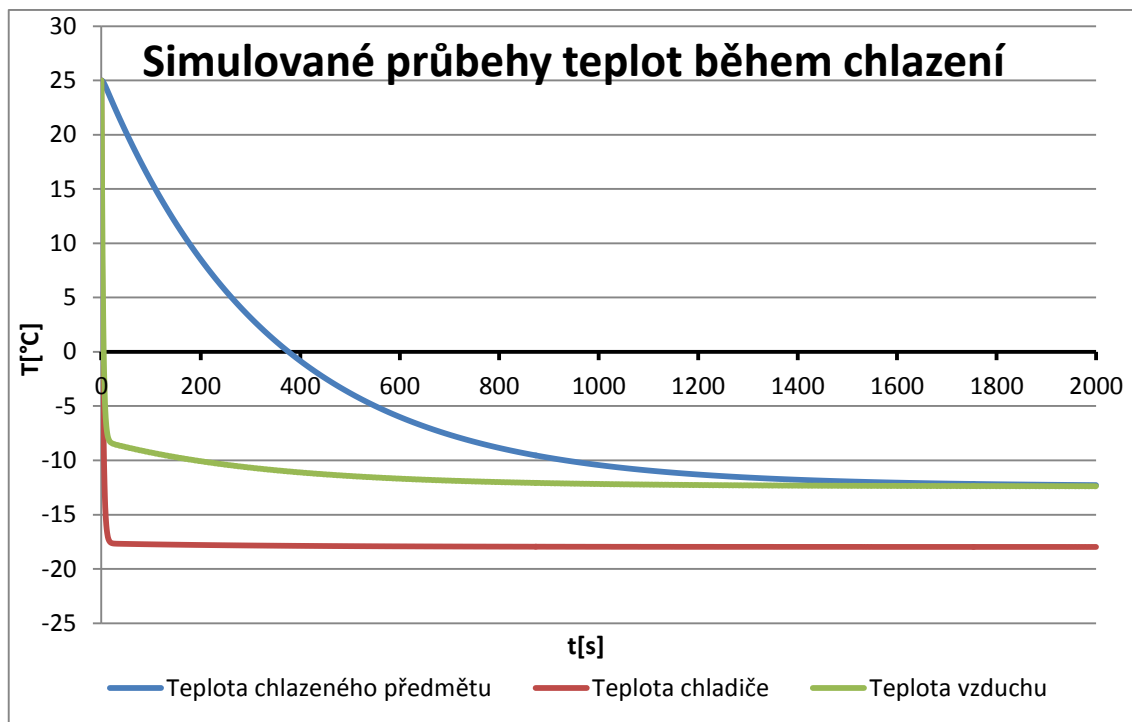
část) se teplota vzduchu uvnitř komory (čidlo #2, zelená barva) přibližuje mnohem rychleji než na pravé straně grafu kdy v komoře větráček nebyl a výměna tepla probíhala přirozenou konvencí. To potvrzuje tvrzení že větráček urychlí výměnu tepelné energie uvnitř komory.



Obrázek 34 Rozdíl mezi vypnutým a zapnutým vnitřním větráčkem

4.2 Porovnání termodynamického modelu v Simulinku a reálné zkoušky

Porovnání modelu v Simulinku s reálnou soustavou není zcela přímočaré. Při pohlednutí na Obrázek 7 si můžete všimnout, že se nastavuje teplotu teplé strany Peltierova článku. Tato teplota je potřebná pro výpočet chladicího výkonu na studené straně. Teplotu ale nejsem schopen změřit protože do těchto míst není přístup. Při pokusech zobrazených v kapitole 4.1 jsem čidlo teploty vložil co nejblíže teplovodivým trubkám aby měla teplota alespoň orientační hodnotu. Na obrázcích z kapitoly 4.1 je tato teplota snímána čidlem #3. Z Obrázek 30 můžeme odečíst teplotu čidla #3 29°C, pokud řekneme že teplá strana má 35°C jako je uvedeno v simulaci na obrázcích z kapitoly 3.1 tak nám dává simulace o jeden stupeň nižší hodnoty. S jistotou ale nemůžu tyto výsledky potvrdit nebo vyvrátit. Případné odchylky reálné soustavy a simulace vznikají kvůli nedokonalé izolaci a nepřesnému modelu Peltierova článku.



Obrázek 35 Výsledné teploty simulace 12V/ zátěž = 0W

4.3 Finální funkčnost

Po zvážení a shrnutí všech získaných výsledků je možné říci, že je zařízení 100% schopné splnit zadání bakalářské práce. Je také schopné sloužit jako testovací zařízení v laboratoři Mechlabu. Zařízení je velmi jednoduché na použití a není potřeba složitého školení na jeho ovládání. Dalo by se říct, že je zařízení složeno z modulů které se dají v případě zájmu a potřeby vyměnit za jiné.

4.4 Porovnání s produkty na trhu

Na trhu se nachází spousta teplotních komor (temperature chamber). V nabídce jsou modely o velikostech cca 2000x1000x500mm které mají následující specifikace:

- -80°C / +177°C (kompresor + stlačený vzduch) cena: 10 500\$
- +3°C / +93°C (kompresor) + řízení vlhkosti cena: 2 500\$ (starší model)
- -35°C / +175°C (kompresor) cena: 9 500\$

pozn.: toto je pouze stručné shrnutí co jsem našel na e-bay(internetu) a určitě to nepokrývá celou nabídku

Nás ale zajímají hlavně miniaturní modely, které se na trhu také nacházejí. V absolutní většině jsou používány jako testovací zařízení v laboratořích. Používají se jako ekosystém pro biologický materiál, nebo na testování součástí strojů a elektronických zařízení. Vybranými zástupci pro porovnání jsou následující přístroje.

Mini Cooling Dry Bath Incubator
Teplotní rozsah je -10°C/100°C. Velikost zařízení 135x152x185mm, vnitřní objem je 47x71x32mm (0,1L). Bez možnosti řízení vlhkosti. Cenu nejsem schopen najít.
Mini Climate Chamber
Teplotní rozsah je 0°C/100°C. Velikost zařízení je nesrozumitelně napsaná ovšem čísla se pohybují kolem 350x350x500mm pro venkovní rozměry. Cenu nejsem schopen najít.
WATER JACKET CHAMBERS
Teplotní rozsah -5°C / 60°C . Zařízení funguje pumpováním tekutiny o požadované teplotě dutým pouzdrem, proto se celá soustava jeví jako nepřenositelná. Možnost řízení vlhkosti. Rozměry chladicí komory jsou přibližně 32x130x170mm. Cenu nejsem schopen najít.
MyTemp Mini incubator
Teplotní rozsah +7°C / 60°C. Venkovní rozměry 335x370x475mm. Vnitřní objem 20L. Cena je 590\$.
Tabletop Temperature Humidity Test Chamber
Teplotní rozsah je +7°C / 60°C. Možnost řízení vlhkosti. Venkovní rozměry jsou 460x380x380mm. Vnitřní objem je 4,6L. Cena 4 895\$.
THERMOTRON S-1.2C ENVIRONMENTAL TEMPERATURE TEST CHAMBER
Teplotní rozsah -73°C / +180°C. Teplotně omezená možnost regulace vlhkosti. Vnitřní objem je 34,6L. Zařízení není přenosné (váha 145kg). Chlazení je pravděpodobně zajišťováno kompresorem. Cena je 4 950\$.
Mechlab teperature chamber
Komora vyvíjena mnou má hmotnost přibližně 5kg. Vnější rozměry cca 600x210x230. Vnitřní objem je 1L. Teplotní rozsah -12°C / 80°C. Nemá možnost řízení vlhkosti. Pořizovací cena materiálu je přibližně 5500Kč. Komora je téměř neslyšitelná i při plném výkonu.

Tabulka 4 Vlastnosti komerčně dostupných zařízení

5 Závěr

Vzniklo přenosné, jednoduše ovládatelné zařízení schopné konkurovat obdobným zařízením na trhu. Máme možnost řídit vnitřní teplotu v rozsahu -12°C až 80°C . Ovládání je zprostředkováno 3,5“ dotykovým displejem, na kterém je možnost zobrazení grafického průběhu teplot, nebo aktuálních teplot. S možností nastavení prioritní teploty která může být statická nebo oscilující.

Při vývoji komory jsem řešil termodynamický model, který se normálně učí až v 5. ročníku. Další výzvou bylo napsání řídicího programu o více než 1000 řádcích. Omezení výpočetní silou procesoru často vedlo k přepsání a optimalizaci již napsaného kódu. Při programování diskrétního PID regulátoru jsem měl jedinečnou možnost pochopit jak regulátor funguje uvnitř. Měl jsem možnost uplatnit své znalosti o spínaných zdrojích při návrhu napájecí desky 12V/5V.

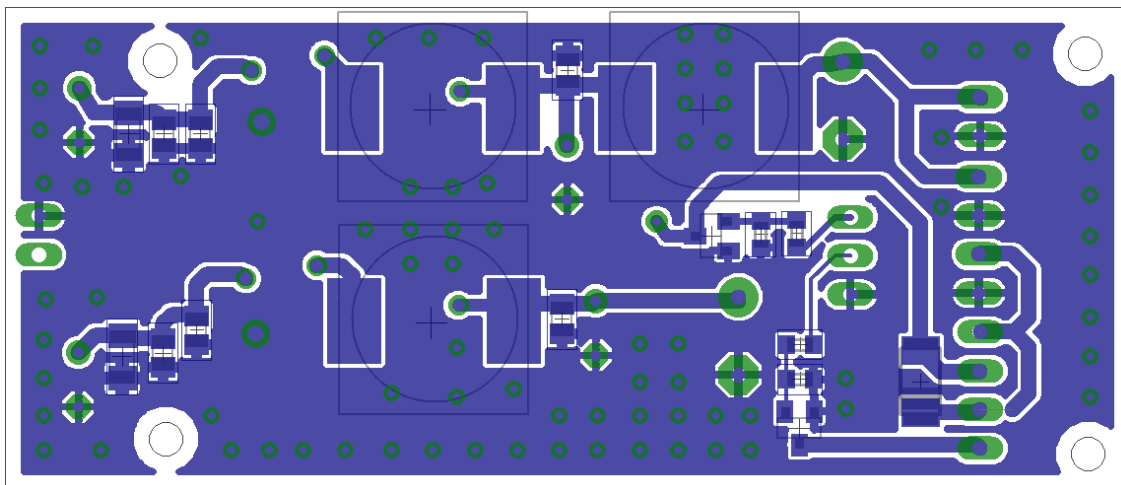
Při řešení jsem se naučil řešit tepelné soustavy a osvojil si programování grafického prostředí, to jsem následně rozšířil o programování v Qt jazyce. Velkým přínosem pro mě byl fakt, že jsem dokázal navrhnout, vytvořit a odladit funkční zařízení, které umí přesně regulovat teplotu v žádaném rozsahu.

Z případných budoucích úprav komory bych doporučil vyměnit izolační materiál za Spaceloft, aby bylo možné dosáhnout nižších teplot. Pro dosažení nižších teplot by se také mohlo navrhnout výkonnější chlazení. Mohlo by se jednat o zlepšení průtoku vzduchu chladiči nebo záměna vzduchových chladičů za vodní chlazení. Jedno z dalších vylepšení by mohla být implementace řízení vlhkosti uvnitř komory. Dále by bylo možné implementovat ukládání průběhu teplot na SD kartu, nebo hodnoty přenášet do počítače pomocí sériové linky.

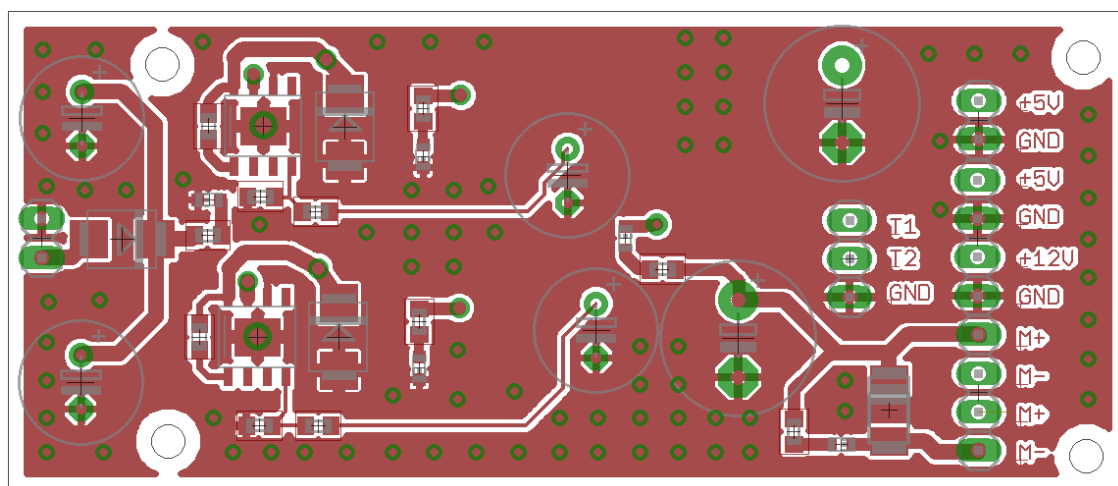
6 Použité zdroje

- [1] COURAGE, Maria-Anna. a Rudolf. STEFEC. *Jahrestagung der osteuropäischen Fachinformatikszentren, 48th CPR session, 21.10.-24.10.1007*. Sankt Augustin: GMD, 1998.
- [2] VLACH, R.: *Tepelné procesy v mechatronických soustavách*. Skripta. VUT Brno, 2009
- [3] HEBEI I.T. *Performance Specifications*[online]. [23.5.2016]. <http://www.gme.cz/img/cache/doc/601/012/peltieruv-clanek-tec1-12710-datasheet-1.pdf>
- [4] VEJLUPEK, J.: *Development of electronics for traction control od experimental vehicle*. Brno: Vysokoučení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 76 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Grepl, Ph.D..
- [5] ALZA, *katalog* [online]. [vid. 23.5.2016]. Dostupné z: <https://m.alza.cz/silentiumpc-fera-2-he1224-d2421040.htm?d=img>
- [6] FISHER ELEKTRONIK GMBH & Co. *Parameters od article ICK BGA 40 x 40 x 10* [online]. [23.5.2016]. <http://www.farnell.com/datasheets/809511.pdf>
- [7] PÉDER, Viktor. Intel Core i5-5300U – nová střední třída pro notebooky. In: notebook [online], 2015. [23.5.2016]. Dostupné z: <http://notebook.cz/clanky/technologie/2015/intel-core-i5-5300u>
- [8] ASCME SYSTEMS SRL. 1-wire bus. In: *ascmesystems* [online]. [23.5.2016]. Dostupné z: <http://www.acmesystems.it/1wire>
- [9] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS5420* [online]. 2nd. Texas Instruments, 2006. [23.5.2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1764415.pdf>
- [10] uLCD-35DT_s_01. In: *4dsystems* [online]. [23.5.2016]. Dostupné z: http://www.4dsystems.com.au/product/uLCD_35DT/

7 Přílohy



Obrázek 36 Layout napájecí desky 12V/5V spodní vrstva



Obrázek 37 Layout napájecí desky 12V/5V vrchní vrstva