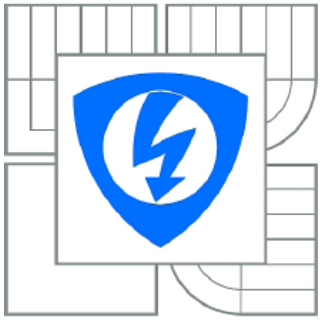
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MALÁ TESTOVACÍ TEPLOTNÍ KOMORA

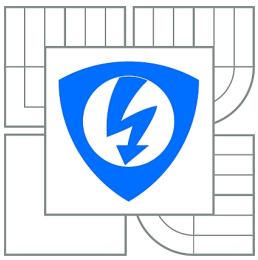
SMALL TEMPERATURE TEST CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Bc. RADEK LUST
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. JIŘÍ ŠEBESTA, Ph.D
SUPERVISOR

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Bc. Radek Lust	***ID:***	106603
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Malá testovací teplotní komora

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte studii řešení testovací teplotní komory pro testování akumulátorůl s využitím Peltierových článků. Uvažujte regulaci procesorovou jednotkou s možností uživatelského programování testovacích cyklů. Navrhněte kompletní zapojení elektronické regulace vytápění/chlazení testovací komory s procesorem. Pro měření teploty využijte vhodně rozmístěná teplotní čidla a efektivní cirkulaci vzduchu pomocí ventilátorů. Navrhněte desky plošných spojů systému. Realizujte a oživte regulátor. Sestavte řídicí firmware mikrokontroléru a ověřte funkčnost systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KRIEDL, M. Měření teploty - senzory a měřicí obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005.

Termín zadání:	6.2.2012	***Termín odevzdání:***	18.5.2012

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.
Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Tato práce je zaměřena na metodiku stanovení parametrů Peltierových baterií a na teorii konstrukce chladícího bloku na základě získaných parametrů. Získaných informací je pak v práci využito k návrhu a konstrukci malé testovací komory pro laboratorní účely.

KLÍČOVÁ SLOVA

Peltierova baterie, Peltierův jev, Peltierův článek, Měření Peltierových baterií, Měření teploty, Testovací komora, H-můstek.

ABSTRACT

This thesis focuses on the methodology of determining the parameters of Peltier batteries and the theory of construction of a cooling block on the basis of obtained parameters. Gathered information is then used for design and construction of a small test chamber for laboratory purposes.

KEYWORDS

Battery Peltier, Peltier effect, Peltier, Peltier battery measurement, temperature measurement, test chamber, H-bridge,

LUST, Radek. *Malá testovací teplotní komora*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 45 s., 16s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Šebesta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Malá testovací teplotní komora jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 15. května 2012 .....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu doc. Ing. Jiřímu Šebestovi, Ph.D, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 15. května 2012 .....

podpis autora

Obsah

Seznam použitých obrázků: **VII**

Seznam tabulek **VIII**

Úvod **9**

1 Teoretické podklady **10**

1.1 Termoelektrické jevy 10
1.2 Peltierův článek 11
1.3 Peltieorva baterie 12

2 Předběžné stanovení parametrů **14**

2.1 Stanovení požadavků na chladicí systém 14
2.2 Určení teoretických parametrů Peltierových baterií 14
2.3 Pokusná zkušební komora 15
2.4 Měření reálných parametrů Peltierovy baterie 19
2.5 Metoda návrhu chladicího bloku 20

3 Konstrukce finální komory **22**

3.1 Chlazení 22
3.2 Konstrukce komory 23

4 Návrh hardwaru **26**

4.1 Výkonová část 26
4.2 Návrh řídícího modulu 28

5 Řídící program **30**

5.1 Struktura programu 30
5.2 Meziprocesové komunikace 30
5.3 Procesy 30

6 Uživatelské rozhraní **36**

6.1 Prostorové uspořádání a technologie ovládání 36
6.2 Funkce komory 37

7 Změřené parametry **40**

8 Závěr **43**

Literatura **44**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **45**

Seznam příloh **46**

Seznam použitých obrázků:

Obr. 1.1: Seebackův jev (převzato z [1]) 10
Obr. 1.2: Peltiérův jev (převzato z [1]) 11
Obr. 1.3: Peltierův článek (převzato z [3]) 11
Obr. 1.4: Energetický popis Peltierova článku 12
Obr. 2.1: Charakteristiky TEC1 12709 15
Obr. 2.2: Model vodního chladiče 16
Obr. 2.3: Vodní chladič 16
Obr. 2.4: Vnitřní část chladicího systému 17
Obr. 2.5: Zapojení teploměru DS18B20 17
Obr. 2.6: Zkušební komora 18
Obr. 2.7: Ztrátový výkon zkušební komory 18
Obr. 2.8: Změřené charakteristiky TEC1-12709 20
Obr. 2.9: Δt v závislosti na přidaném tepleném zatížení 21
Obr. 3.1: Konstrukce chladícího bloku 22
Obr. 3.2: Schématický diagram chladicího systému 23
Obr. 3.3: Konstrukce komory 24
Obr. 3.4: Pohled na předek komory 24
Obr. 3.5: Pohled na zadní část komory 25
Obr. 4.1: PWM regulátor 27
Obr. 4.2: Zapojení H-můstku 28
Obr. 4.3: Blokové schéma propojení řídící jednotky s okolím 29
Obr. 5.1: Přehled pracovních stavů procesu Správce LCD 31
Obr. 5.2: Struktura regulačního procesu 33
Obr. 5.3: Vývojový diagram a výstupní projev regulačních algoritmů 33
Obr. 5.4: Porovnání regulačních křivek algoritmu 1 a 2 34
Obr. 5.5: Diagram procesu měření teploty 34
Obr. 5.6: Diagram detekce tlačítek 35
Obr. 6.1: Výřez ovládacího panelu 36
Obr. 6.2: Ukázka nastavení parametrů pro režim cyklování 37
Obr. 6.3: Rozdíly mezi režimem jedna a režimem dva 38
Obr. 6.4: Ukázka formátu přijímaných dat v terminálu 39
Obr. 7.1: Průběh teploty v komoře v čase při plném chladícím výkonu a různé vložené tepelné zátěži 40
Obr. 7.2: Závislost minimální teploty v komoře na vloženém tepelném výkonu 40
Obr. 7.3: Průběh teploty v komoře při přechodu regulace z algoritmu 2 na algoritmus 1 41
Obr. 7.4: Průběh teploty v komoře při přechodu regulace z algoritmu 1 na algoritmus 2 42

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Přehled katalogových hodnot vybraných Peltierových baterií [7][8] 14
Tab. 2.2: Přehled naměřených hodnot TEC1-12709 bez přidaného zatížení 19
Tab. 2.3: Přehled naměřených hodnot TEC1-12709 s přidanou zátěží 20W 19
Tab. 6.1: Přehled podporovaných příkazů 37
Tab. 7.1: Shrnutí technických parametrů testovací komory 42

Úvod

Při vývoji různých zařízení od elektronických po mechanické se vyskytuje potřeba testovat jejich funkci za různých provozních podmínek. Cílem této práce je prověřit možnost konstrukce teplotní testovací komory založené na použití Peltierových článků a na základě získaných poznatků komoru zkonstruovat.

Tento projekt lze rozdělit na několik dílčích částí. První část je zaměřena na teoretické podklady, především v oblasti termoelektrického jevu a technologii Peltierových článků. Druhá část je zaměřena na stanovení návrhových metod, které by bylo možné použít při konstrukci komory, na teoretický popis chování Peltierova článku a v neposlední řadě pak na metodiku stanovení reálných parametrů Peltierových baterií. Předposlední část je zaměřena na návrh testovací komory jako celku, počínaje mechanickou konstrukcí, následným návrhem hardwaru a konče rozborem řídícího programu společně s uživatelským rozhraním. Poslední část je pak věnována prezentaci naměřených parametrů výsledné testovací komory.

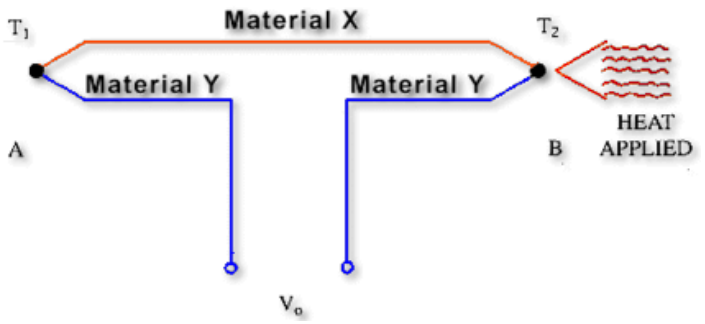
1 Teoretické podklady

1.1 Termoelektrické jevy

Jako termoelektrický jev je označován fyzikální proces, při kterém dochází k přeměně tepelné energie na elektrickou. Termoelektrický jev lze rozdělit na tři jevy.

První z nich je označován jako Thomsův jev, který vzniká, pokud dojde k zahřátí dlouhé kovové tyče v jejím středu, přičemž její konce mají stejnou teplotu. Je-li v tomto stavu do tyče přiveden elektrický proud, začne se tepelná energie šířit více ve směru toku proudu, což se projevuje snížením teploty konce tyče na jedné straně a zvýšením teploty konce tyče na straně druhé.

Dalším z řady je Seebackův jev, který se projevuje při spojení dvou kovových vodičů z různého kovu, přičemž místa obou spojů mají různou teplotu. V tomto obvodu pak dochází ke vzniku termoelektrického napětí, uspořádání, je patrné z obrázku Obr. 1.1. Toto napětí je pro většinu kovů velice malé a i výkon uvolnitelný z těchto tepelných přechodů je velice nízký a obtížně využitelný.

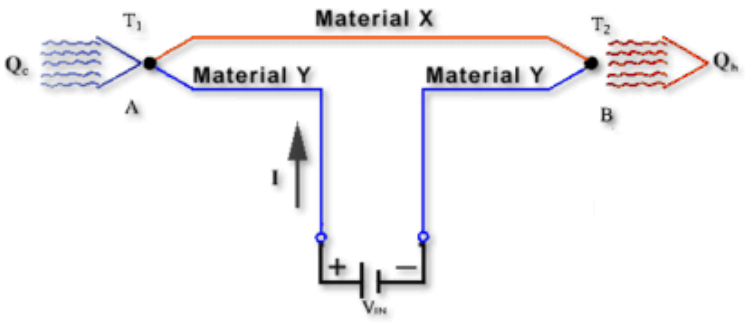


Obr. 1.1: Seebackův jev (převzato z [1])

Pro tento projekt je však nejdůležitější Peltiérův jev. Jedná se o stejnou modelovou situaci jako v případě Seebackova jevu, avšak s tím rozdílem, že na volné svorky je připojen stejnosměrný zdroj elektrického proudu. Situaci popisuje obrázek Obr. 1.2. Teče-li proud z vnějšího zdroje daným spojem stejným směrem, jakým by tekl v případě uzavření smyčky, pak se daný spoj ochlazuje. Prochází-li proud směrem opačným, pak se spoj ohřívá. Peltierův efekt závisí na druhu kovů a na jejich teplotě. Jedná se tedy o jev opačný k Seebackovu jevu.[1][2]

Tento jev je výsledkem změny entropie nosičů náboje při průchodu přechodem. Úplné a korektní vysvětlení dějů probíhajících ve vodičích podává fyzika pevných látek a kvantová fyzika. Vznik termoelektrického napětí je možné vysvětlit teorií, podle níž se vodiče dělí na vodiče monopolární (typ *n* a typ *p*) a vodiče ambipolární. V monopolárních vodičích typu *n* jsou většinovými nosiči elektrických nábojů elektrony, ve vodičích typu *p* kladné díry. Tyto vodiče se vzájemně liší ve způsobu přenosu elektrických nábojů, jsou-li umístěné v teplotním gradientu. Při zahřátí vodičů typu *n* (např. měď) dochází k uvolňování elektronů z atomů, případně molekul krystalové mříže a jejich přemísťování směrem k chladnějšímu konci vodiče, který nabíjí záporně. Protože velikost celkového náboje ve vodiči se nemění, úbytek elektronů se projevuje kladným nábojem teplejšího konce. U vodiče typu *n* se tedy při výskytu teplotního rozdílu jeví chladnější konec jako záporný, u vodiče typu *p* naopak jako kladný. Čili pohyb elektronů trvá, dokud jej nezabrzdí elektrostatické pole, které se vytváří mezi elektrony a zbylými pozitivními ionty. V tomto okamžiku vyrovnaného stavu vzniká pak vlivem potenciálního rozdílu difúze elektronů opačným směrem, tj. od studeného konce k teplému, počet difundujících elektronů se rovná právě počtu elektronů sublimujících v obráceném směru následkem teplotního rozdílu. Odtržené elektrony nesoucí záporný náboj jsou volně pohyblivé, chovají se podobně jako molekuly plynu. Protože energie tohoto elektronového plynu závisí na teplotě, elektrony přicházející z teplého konce k chladnému přinášejí více energie než v

opačném směru. I po dosažení vyrovnaného stavu tak vzniká trvalý tok tepla směrem od teplého konce k chladnému konci vodiče. [9]



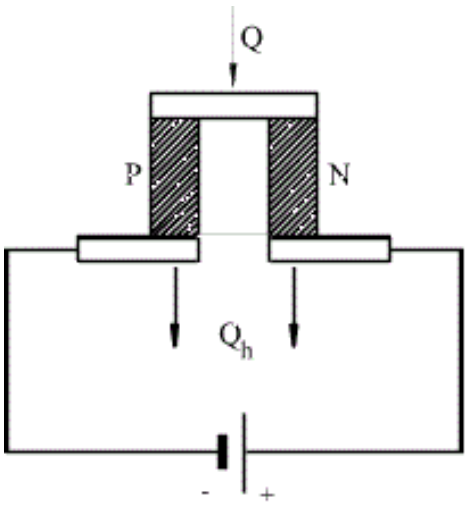
Obr. 1.2: Peltiérův jev (převzato z [1])

1.2 Peltierův článek

Na principu výše zmíněného Peltierova jevu je pak založena konstrukce tzv. Peltierova článku. Tyto články tvoří dvě polovodičová tělíska, která jsou vzájemně spojena obvykle měděným spojovacím můstkem, viz obrázek **Obr.** 1.3.

Základní materiály pro polovodičové části článku bývají převážně tvořeny vizmut-telluridy, tj. termální systémy Bi-Te-Se (N-typ) a Bi-Sb-Te (P-typ). Výhodou těchto materiálů jsou jejich poměrně dobré termoelektrické vlastnosti ve spojení s nízkým měrným elektrickým odporem a malou tepelnou vodivostí. Problém může nastat v místě styku vodivého můstku s polovodičem, kde vzniká přechodový odpor, který může značně ovlivnit maximální chladící výkon. Velikost tohoto odporu je do značné míry závislá na technologii výroby.

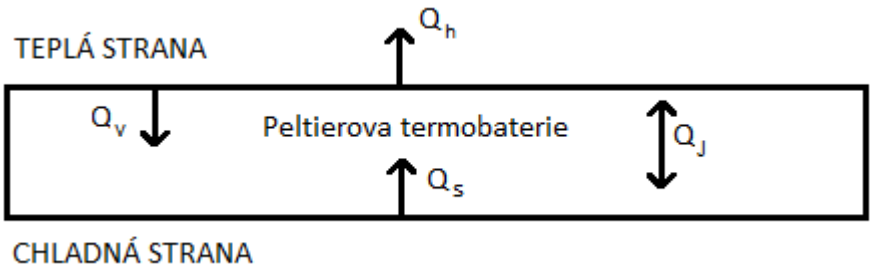
Aby bylo možné dosáhnout vyšší chladící výkon, spojují se Peltierovy články do série a vytváří pak tzv. Peltierovu baterii.



Obr. 1.3: Peltierův článek (převzato z [3])

1.3 Peltieorva baterie

Aby bylo možné navrhnout účinný chladicí systém na bázi Peltierových baterií, je nutné vyjádřit základní matematické vztahy, které popisují chování baterie za určitých podmínek. Základní situace pak odpovídá obrázku **Obr.** 1.4.



Obr. 1.4: Energetický popis Peltierova článku

Kde Q_h označuje Peltierův tepelný výkon

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I_{Pe} \quad [\mathrm{W}; {}^{\mathrm{V}}/_{\circ\mathrm{K}}, {}^{\circ}\mathrm{K}, \mathrm{A}], \tag{1.1}$$

Q_s teplo odváděné chladnou stranou

$$Q_s = \alpha \cdot T_s \cdot I_{Pe} \quad [\mathrm{W}; {}^{\mathrm{V}}/_{\circ\mathrm{K}}, {}^{\circ}\mathrm{K}, \mathrm{A}], \tag{1.2}$$

Q_J je Jouleovo teplo vznikající uvnitř článku za provozu

$$Q_J = \mathrm{R_{Pč}} \cdot I_{Pe}^2 \quad [\mathrm{W}; {}^{\mathrm{V}}/_{\circ\mathrm{K}}, {}^{\circ}\mathrm{K}, \mathrm{A}] \tag{1.3}$$

a Q_v pak odpovídá průchodu tepelné energie z teplejší strany na chladnou

$$Q_V = K \cdot \Delta T \quad [W; \tfrac{W}{^{\circ}C}, {}^{\circ}C]. \tag{1.4}$$

Přičemž platí, že T_h označuje teplotu teplé strany Peltierova článku, T_s teplotu chladné strany Peltierova článku, ΔT odpovídá vztahu

$$\Delta T = T_h - T_S \quad [{}^{\circ}C; {}^{\circ}K, {}^{\circ}K], \tag{1.5}$$

$R_{Pč}$ odporu jednoho Peltierova článku. Tento parametr lze stanovit pomocí vztahu

$$R_{P\check{c}} = \frac{2 \cdot Q_0}{n \cdot I_{Pm^2}} \quad [\mathrm{W}; \mathrm{W}, -, \mathrm{A}]. \tag{1.6}$$

I_{Pe} vyjadřuje proud tekoucí Peltierovým článkem a α je definováno jako termoelektrické napětí Peltierova článku odpovídající vtahu

$$\alpha = \frac{R_{P\check{c}} \cdot \mathrm{I_{Pm}}}{T_s} \quad [\tfrac{V}{^{\circ}K}; \Omega, A, {}^{\circ}K], \tag{1.7}$$

kde $\mathrm{I_{Pm}}$ je maximální proud Peltierova článku, opět se jedná o hodnotu udávanou výrobcem. Poslední nedefinovanou proměnou je K ve vztahu (1.4), které odpovídá tepelné vodivosti Peltierova článku, kterou lze stanovit podle následujícího vztahu

$$K = K_0 - \alpha \cdot I_{Pe} \quad [{}^{\mathrm{W}}/_{\circ\mathrm{C}}; {}^{\mathrm{W}}/_{\circ\mathrm{C}}, {}^{\mathrm{V}}/_{\circ\mathrm{K}}, \mathrm{A}], \tag{1.8}$$

K_0 definované vztahem (1.8) pak odpovídá tepelné vodivosti článku pro nulový rozdíl teplot na teplé a studené straně Peltierova článku. Pro tento stav, tedy $T_h=T_s \rightarrow \Delta T=0$, jsou definovány i následující vztahy, jejichž dolní index obsahuje nulu.

$$K_0 = \frac{Q_0}{n \cdot \Delta T_{max}} \quad [{}^{\mathrm{W}}/_{\circ\mathrm{C}}; \mathrm{W}, -, {}^{\circ}\mathrm{C}] \tag{1.9}$$

Kde n představuje počet článků v Peltierově baterii, jedná se o katalogovou hodnotu, ΔT_{max} maximální rozdíl teplot teplé a studené strany, opět se jedná o katalogovou hodnotu a nakonec Q_0, což je maximální chladící výkon Peltierovy baterie, pro proud $\mathrm{I_{Pm}}$ (maximální katalogový proud) tato hodnota odpovídá katalogové hodnotě, pro jiné proudy je jí nutno stanovit dle vztahu

$$Q_0 = n \cdot \left(\alpha \cdot T_h \cdot I_{Pe} - \frac{1}{2} \cdot I_{Pe}^2 \cdot R_{P\check{c}}\right) \qquad [\mathrm{W}; -, {}^{\mathrm{V}}/_{\circ\mathrm{K}}, {}^{\circ}\mathrm{K}, \mathrm{A}, \mathrm{A}, \Omega] \quad (1.10)$$

Nyní, když jsou definovány všechny potřebné dílčí vztahy, je možné stanovit celkový chladící výkon Q_{ch} jako

$$Q_{ch} = n \cdot \left(Q_s - \frac{1}{2} Q_J - Q_V\right) = \qquad [\mathrm{W}; -, \mathrm{W}, \mathrm{W}, \mathrm{W}]$$

$$= n \cdot \left(\alpha \cdot T_s \cdot I_{Pe} - \frac{1}{2} \cdot R_{P\check{c}} \cdot I_{Pe}^2 - K \cdot \Delta T\right) \qquad [-, {}^{\circ}K, A, \Omega, A, {}^{\circ}K, {}^{\circ}C] \quad (1.11)$$

a účinnost chlazení (ε_{Pe}) jako

$$\varepsilon_{Pe} = \frac{Q_{ch}}{P_{Pe}} \cdot 100 \qquad [\%; \mathrm{W}, \mathrm{W}]. \qquad (1.12)$$

P_{Pe} pak odpovídá tepelnému výkonu Peltierovy baterie a je tvořen součtem Jouelova tepla a výkonu potřebného na překonání termoelektrické síly, vyjádřit ho lze následujícím vztahem

$$P_{Pe} = Q_J + Q_S = n \cdot (R_{P\check{c}} \cdot I_{Pe}^2 + \alpha \cdot \Delta T \cdot I_{Pe}), \ [W; -, \Omega, A, \frac{V}{{}^{\circ}K}, {}^{\circ}C, A] \qquad (1.13)$$

v tomto vztahu již nejsou žádné neznámé proměnné, které by nebyly již výše definovány. Na základě vztahů (1.9), (1.13) a (1.11) je již možné stanovit parametry Peltierovy baterie pro různý napájecí proud a různý rozdíl teplot pouze na základě katalogových hodnot.[4][5]

2 Předběžné stanovení parametrů

2.1 Stanovení požadavků na chladicí systém

Při návrhu chladícího bloku je nejprve nutno stanovit teplotní rozsah, který by komora měla být uvnitř schopna dosáhnout. Jakožto rozumný a pro většinu případů postačující kompromis by měl postačovat zaručený rozsah -20°C až +60°C, dále budou tyto teploty označovány jako T_{ZMIN}, T_{ZMAX}. Zároveň by bylo žádoucí zajistit udržení minimální teploty i za předpokladu, že testovaný objekt bude zdrojem tepla. Tento tepelný výkon bude dále označován jako P_{TVZ} a je stanoven na 5W, což by měl být dostatečný výkon pro většinu testovaných objektů.

Nyní je ještě nutné stanovit předběžným výpočtem předpokládaný ztrátový výkon samotné komory při T_{ZMIN}. Počítáme-li s vnější teplotou prostředí (T_{pros}) 25 °C, odpovídá teplotní spád (T_{roz}) vztahu

$$T_{roz} = T_{pros} - T_{ZMIN} = 20 - (-25) = 45°C \qquad [°C; °C, °C]. \qquad (2.1)$$

Požadavek zadaní projektu je objem 5l, což po připočtení prostoru odhadovaného pro instalaci vnitřního ventilátoru a chladiče lze zaokrouhlit na krychli o vnitřních rozměrech 20×20 cm, základní izolaci budeme uvažovat 5cm (d) silnou vrstvu pěnového polystyrenu, jehož tepelná vodivost (λ) odpovídá 0,04 $W \cdot m^{-1} \cdot °K^{-1}$[6]. Pro velmi zjednodušený výpočet budeme uvažovat za plochu tepelného přechodu vnitřní plochu krychle (S_{VK}) odpovídající 0,24 m^2, podle vztahu na výpočet tepelných ztrát,

$$P_{mzk} = \lambda \cdot S_{VK} \cdot \frac{T_{roz}}{d} = 0{,}04 \cdot 0{,}24 \cdot \frac{45}{0{,}05} = 8{,}64W \quad \left[W; {}^{W}/_{m \cdot °C}, m^2, °C, m\right], \quad (2.2)$$

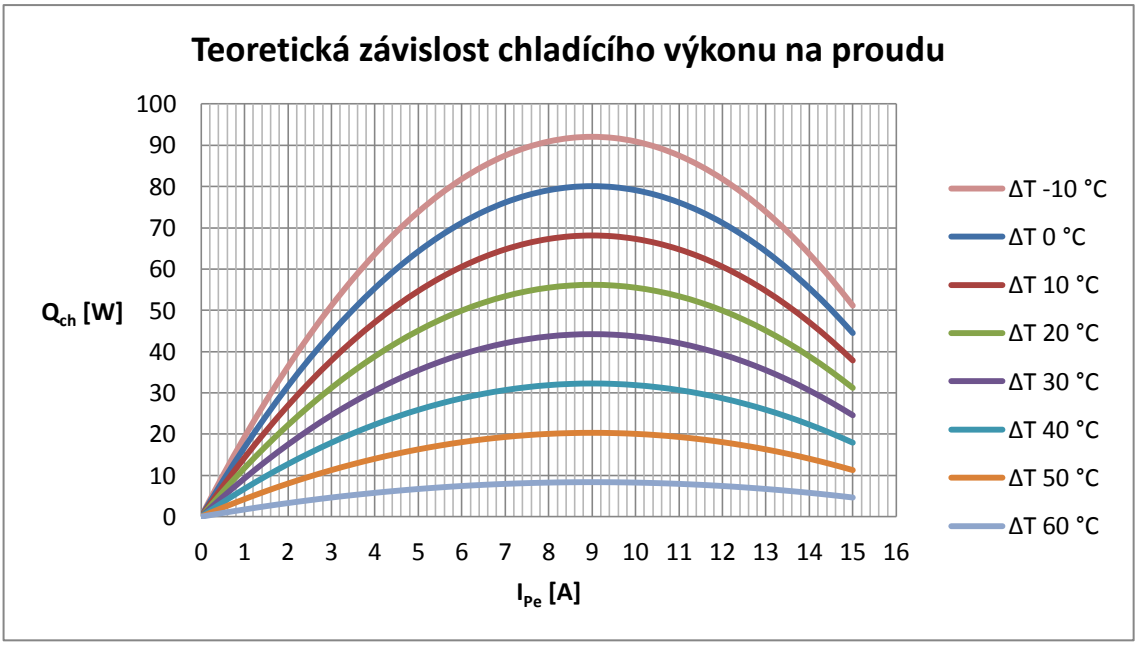
byla stanovena teoretická ztráta ideální komory. S ohledem na fakt, že do tohoto výpočtu nejsou zahrnuty tepelné ztráty způsobené přístupovým otvorem, průchodkami kabelů, nedokonalostí spojů a mnohé další ztráty, přičteme ke stanovené hodnotě rezervu 25%, čímž navýšíme P_{mzk} na přibližně na 11W. Prostým součtem P_{TVZ} a P_{mzk} pak získáme požadovaný chladící výkon (P_{CHP}) 16W.

2.2 Určení teoretických parametrů Peltierových baterií

Dalším krokem návrhu chladicího systému je výpočet základnách parametrů pro různé typy Peltierových baterií. Požadované údaje jsou především chladící výkon (Q_{ch}), tepelný výkon (P_{Pe}) a jako doplňkový údaj je vhodné stanovit i účinnost baterie. Příklad katalogových hodnot pro několik Peltierových baterií, které jsou dostupné ve vlastních zásobách, je uveden v tabulce Tab. 2.1. Následují charakteristiky chladícího výkonu (obrázek Obr. 2.1) stanovené na základě vztahu (1.11), pro baterii TEC1 12709.

Tab. 2.1: Přehled katalogových hodnot vybraných Peltierových baterií [7][8]

TEC1-XXXXX						
řada	**n [-]**	**I_{pm} [A]**	**U_{max} [V]**	**Q_0 [W]**	**ΔT_{max} [°C]**	**$R_{Pč}$ [Ω]**
12709	127	9	15,4	80,1	67	0,010709
12703	127	3	15,4	26,7	67	0,026929
12702	127	2	15,4	18,5	67	0,028346

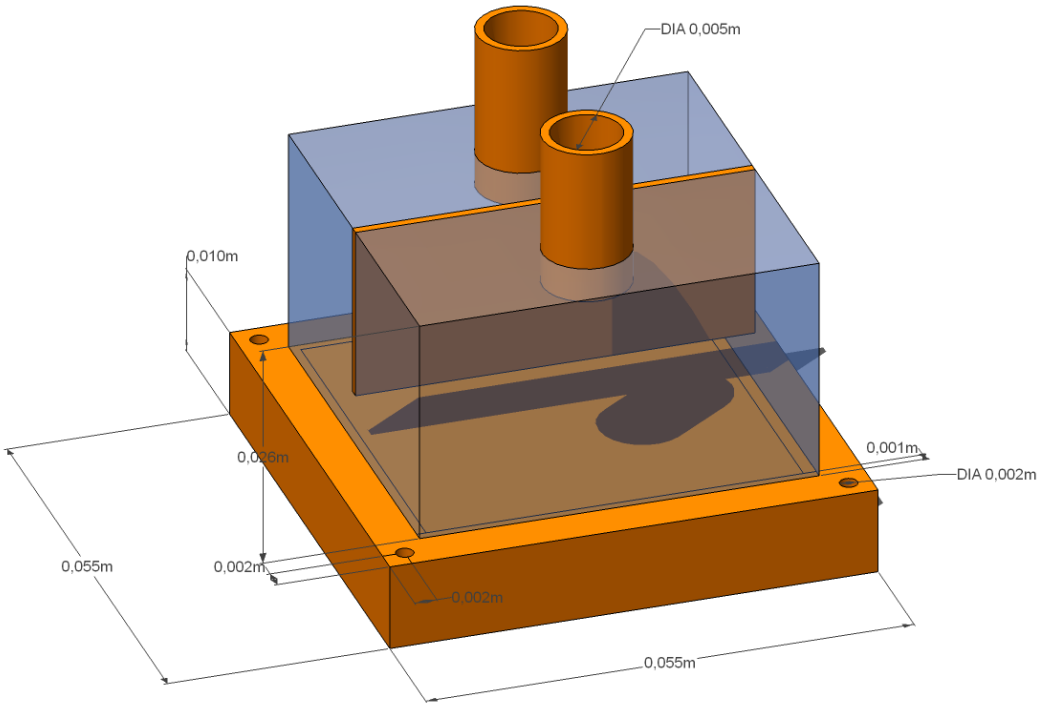


Obr. 2.1: Charakteristiky TEC1 12709

Z grafu stanovená závislost je však pouze teoretická, založená na výpočtech se zanedbáním některých dalších neznámých proměnných (přechodové odpory, nelinearita teplených přechodů…). Dalším problémem je, že data udávaná čínskými výrobci neodpovídají skutečnosti a navíc jsou vztažena k teplotě T_h 27°C, což je v praxi při plném výkonu téměř nedosažitelná hodnota. Aby bylo možné teoretická data ověřit, bylo nutné zkonstruovat pokusnou zkušební komoru, v níž bylo možné instalovat různé Peltierovy baterie a podrobit je důkladnému měření.

2.3 Pokusná zkušební komora

Zkušební komora pro měření reálných parametrů Peltierových baterií, byla zkonstruována ze zbytků přepravních polystyrenových výplní. Dále byl pro tuto komoru navržen modul vodního chlazení, obrázek Obr. 2.2. Vodní chlazení bylo zvoleno s ohledem na nutnost odvést poměrně velké množství odpadního tepla do dostatečné vzdálenosti od komory, kde může být umístěn efektivní výměník. V původním návrhu bylo počítáno s tenčí základní deskou, avšak návrh musel být upraven s ohledem na dostupný materiál. Výsledná konstrukce je pak vyobrazena na obrázku Obr. 2.3.



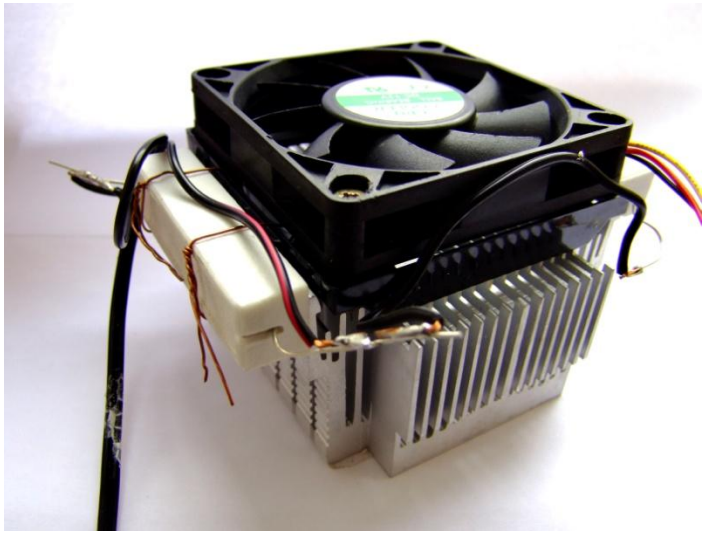
Obr. 2.2: Model vodního chladiče

Obr. 2.3: Vodní chladič

O cirkulaci vody v systému se stará ponorné čerpadlo určené pro pokojové fontány. Použití tohoto typu čerpadla je sice znevýhodněno řadou omezení, jako je malý výtlak, nutnost ponoru a omezení teploty čerpané vody (max. 35°C), avšak velkou výhodou je nízká pořizovací cena a prakticky bezúdržbový provoz. Tepelný výměník v této fázi vývoje zatím nebyl vyřešen a pro pokusné účely bylo prozatímně využito vědro o objemu 9l.

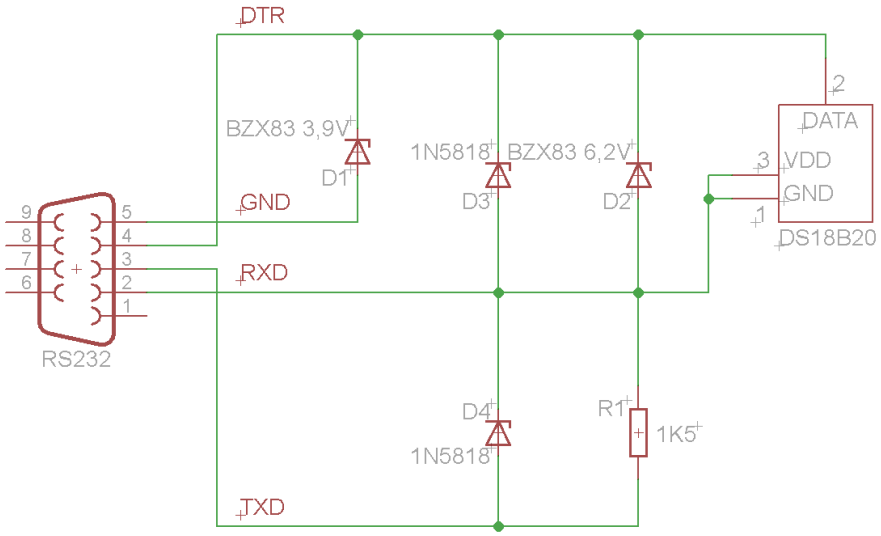
Na vnitřní straně komory je instalován chladič osazený ventilátorem, pro zajištění vnitřní cirkulace vzduchu, dále je vnitřní část osazena odporovými tělesy o celkové zatížitelnosti 40W. Tato tělesa pak během testování umožní simulovat tepelné zatížení

chladicího systému a zároveň také poslouží ke stanovení parametrů komory. Tento vnitřní blok je zobrazen na obrázku Obr. 2.4.



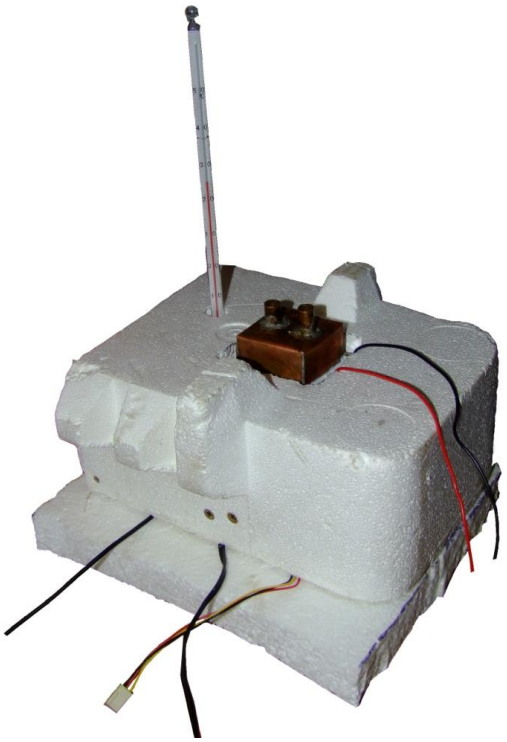
Obr. 2.4: Vnitřní část chladicího systému

Další nezbytnou součástí zkušební komory je systém měření teploty. S ohledem na velmi dlouhé časy měření a nutnost zpracování řádově stovek až tisíců hodnot byl zkonstruován jednoduchý teploměr s použitím obvodu DALAS DS18B20. Tento obvod využívá sběrnici 1-Wire Bus a pro připojení tohoto teploměru s PC pomocí sériového portu stačí velmi jednoduché zapojení, zajišťující upravení napěťových úrovní, obrázek Obr. 2.5. V počítači je pak použita aplikace LogTemp, která umožňuje nastavení intervalů snímání a záznam naměřených hodnot do log souboru.



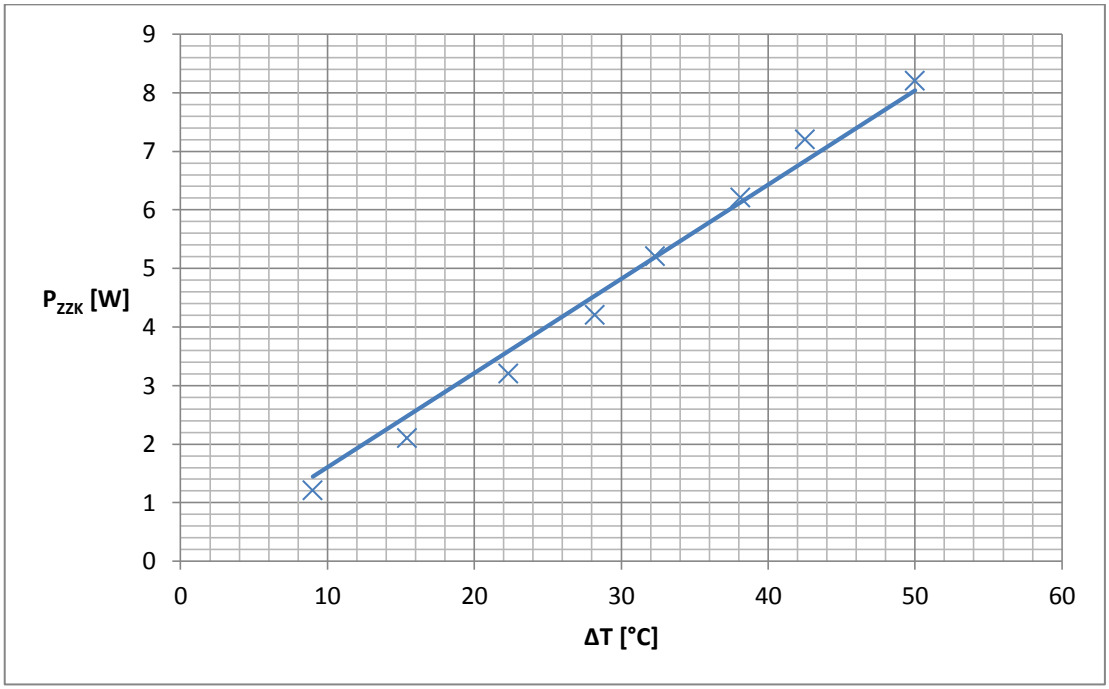
Obr. 2.5: Zapojení teploměru DS18B20

Pro kontrolu přesnosti měření je komora vybavena ještě kapalinovým laboratorním obalovým teploměrem s rozsahem stupnice -30°C až 50°C a dělením stupnice po 0,5°C. Výsledná konstrukce komory je pak patrná z obrázku Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Zkušební komora

Aby zkušební komora poskytovala relevantní data, bylo nutné analyzovat vlastnosti zkušební komory, především její teplený ztrátový výkon. Pro měření byla přídavnou izolací tepelně zaizolována vnější část chladicího systému, která by jinak způsobovala velké zkreslení. Samotné měření pak bylo realizováno nastavením konstantního výkonu na vnitřních zátěžových rezistorech a po stabilizaci teploty v komoře byl odečten rozdíl vnější a vnitřní teploty. Kompletní měřící cyklus během kterého bylo proměřeno 8 různých výkonů probíhal po dobu 48 hodin a jeho výsledky jsou patrné z obrázku Obr. 2.7.



Obr. 2.7: Ztrátový výkon zkušební komory

2.4 Měření reálných parametrů Peltierovy baterie

Jako první byla do zkušební komory instalována Peltierova baterie TEC1-12709, jejíž teoretické parametry jsou již stanoveny a zobrazeny v grafu na obrázku Obr. 2.1. Výsledky měření jsou pak patrné z tabulky Tab. 2.2: a Tab. 2.3:, kde t_{chla} představuje teplotu chladicí kapaliny na vstupu do chladiče, t_{zk} teplotu uvnitř zkušební komory, ΔT_{PEL} teplotní rozdíl vnitřku komory oproti teplotě chladicí kapaliny, ΔT_{OK} rozdíl teplot vnitřku komory vůči vnější teplotě prostředí (uvažováno 25°C), Q_{chr} odpovídá reálnému chladícímu výkonu stanovenému ze ztrátové charakteristiky komory odpovídající grafu z obrázku Obr. 2.7, Q_{cht} definuje teoretický chladící výkon odečtený z vypočtených charakteristik, viz obrázek Obr. 2.1. Poslední dva sloupce Q_{chx} pak vyjadřují absolutní a relativní odchylku od teoretických výpočtů. Grafické znázornění hlavních získaných parametrů je pak na obrázku Obr. 2.8.

Tab. 2.2: Přehled naměřených hodnot TEC1-12709 bez přidaného zatížení

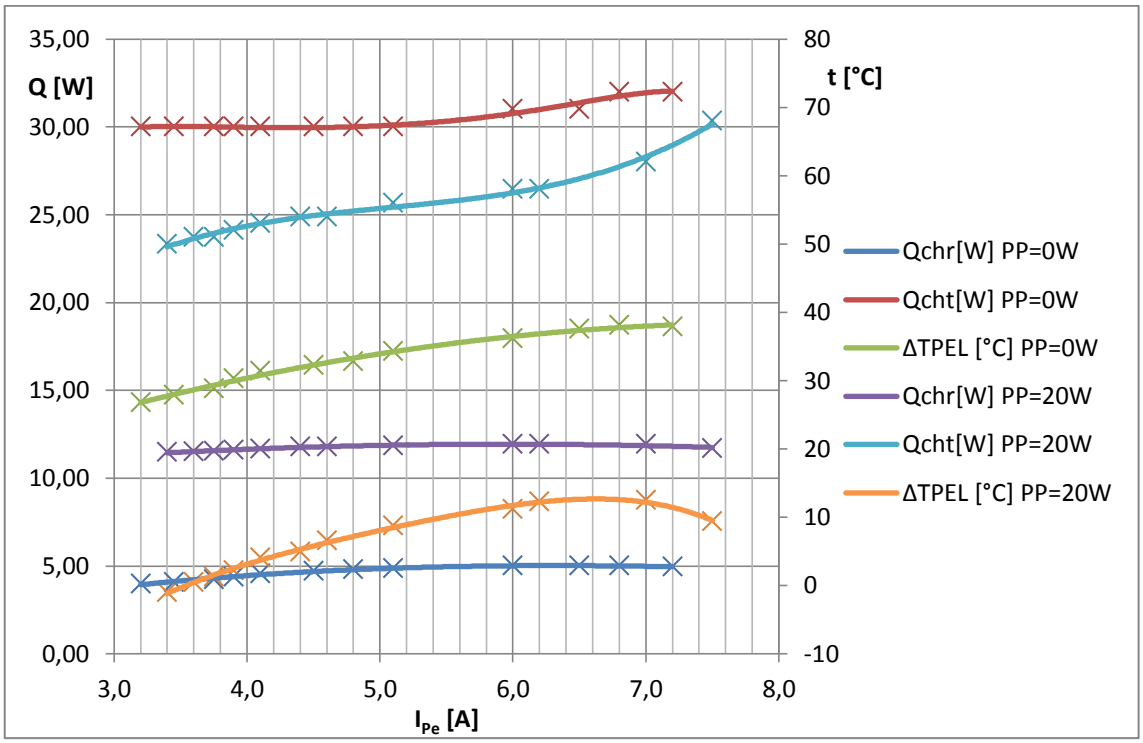
I_{Pe} [A]	t_{chla} [°C]	t_{Zk} [°C]	ΔT_{PEL} [°C]	ΔT_{OK} [°C]	Q_{chr}[W]	Q_{cht}[W]	ΔQ_{chX}[W]	ΔQ_{chX}[%]
3,2	27,0	0,2	26,8	24,8	3,99	30	26,01	86,7
3,5	27,5	-0,4	27,9	25,4	4,09	30	25,91	86,4
3,8	27,5	-1,3	28,8	26,3	4,23	30	25,77	85,9
3,9	28,0	-2,3	30,3	27,3	4,39	30	25,61	85,4
4,1	28,0	-3,4	31,4	28,4	4,57	30	25,43	84,8
4,5	28,0	-4,3	32,3	29,3	4,71	30	25,29	84,3
4,8	28,0	-4,8	32,8	29,8	4,79	30	25,21	84,0
5,1	29,0	-5,3	34,3	30,3	4,88	30	25,12	83,7
6,0	30,0	-6,2	36,2	31,2	5,02	31	25,98	83,7
6,5	31,5	-6,1	37,6	31,1	5,00	31	26,00	83,9
6,8	32,0	-6,1	38,1	31,1	5,00	32	27,00	84,4
7,2	32,0	-5,9	37,9	30,9	4,97	32	27,03	84,5
P_P=	0,0	W						

Tab. 2.3: Přehled naměřených hodnot TEC1-12709 s přidanou zátěží 20W

I_{Pe} [A]	t_{chla} [°C]	t_{Zk} [°C]	ΔT_{PEL} [°C]	ΔT_{OK} [°C]	Q_{chr}[W]	Q_{cht}[W]	ΔQ_{chx}[W]	ΔQ_{chx}[%]
3,4	27,0	28,0	-1,0	-3,0	19,52	50	30,48	61,0
3,6	28,0	27,5	0,5	-2,5	19,60	51	31,40	61,6
3,8	28,0	26,7	1,3	-1,7	19,73	51	31,27	61,3
3,9	28,0	25,8	2,2	-0,8	19,87	52	32,13	61,8
4,1	29,0	24,9	4,1	0,1	20,02	53	32,98	62,2
4,4	28,0	23,1	4,9	1,9	20,31	54	33,69	62,4
4,6	29,5	22,9	6,6	2,1	20,34	54	33,66	62,3
5,1	31,0	22,2	8,8	2,8	20,45	56	35,55	63,
6,0	32,0	20,8	11,2	4,2	20,68	58	37,32	64,4
6,2	33,0	20,7	12,3	4,3	20,69	58	37,31	64,3
7,0	33,0	20,5	12,5	4,5	20,72	62	41,28	66,6
7,5	34,0	24,6	9,4	0,4	20,06	68	47,94	70,5
P_P=	20,0	W						

Z tabulek jsou patrné velké odchylky od teoretických parametrů, důvodem těchto odchylek může být i nezapočtený tepelný přestup mezi vnějším a vnitřním chladičem, proto

bylo nutné se při dalších pokusech, zaměřit na tento jev, definovat ho a v případě potřeby se ho pokusit minimalizovat.

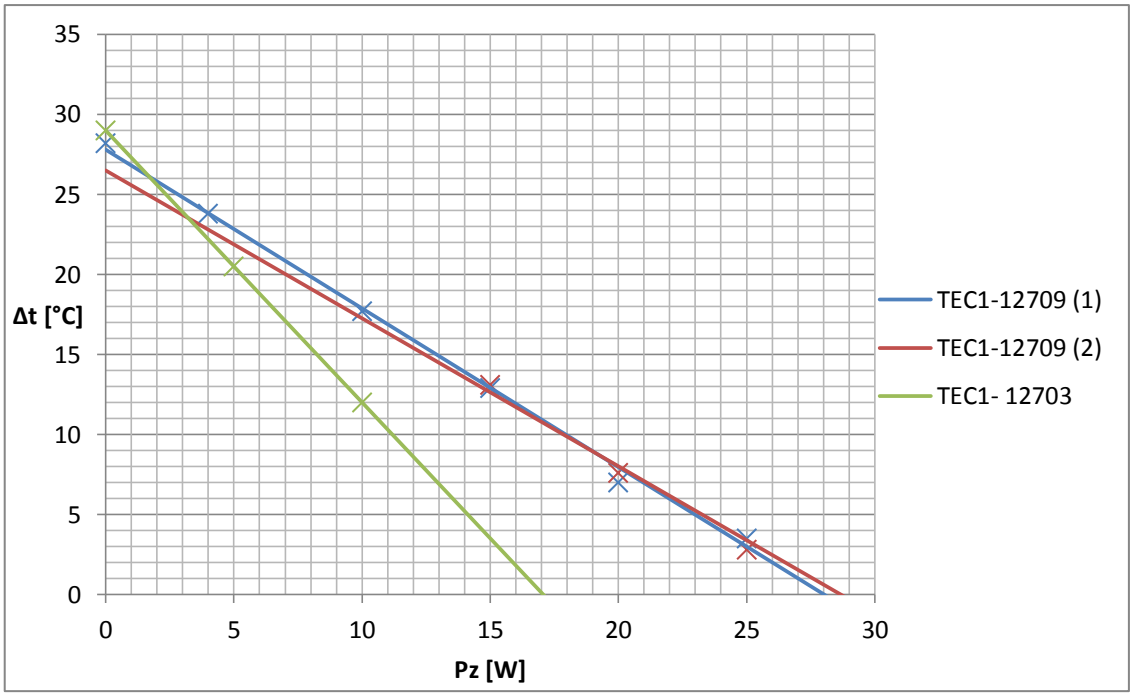


Obr. 2.8: Změřené charakteristiky TEC1-12709

2.5 Metoda návrhu chladicího bloku

Z teoretických parametrů Peltierovy baterie TEC1-12709, obrázek Obr. 2.1, by se mohlo jevit, že při použití dostatečně výkonného odvodu odpadního tepla, by mohla postačovat pouze jedna Peltierova baterie jen s o málo vyšším výkonem, než je uváděný výkon TEC1-12709. Avšak s ohledem na změřené charakteristiky je patrné, že pro dosažení požadovaných parametrů nebude postačovat pouze jedna baterie, ale bude nutné vytvořit kaskádu tvořenou minimálně dvěma Peltierovými bateriemi.

Pro konkrétní návrh bylo zapotřebí proměřit více typů Peltierových baterií, aby bylo možné prokázat, že získané parametry nejsou dominantou pouze jednoho konkrétního modulu. Výstupy měření prokázaly, že ostatní moduly vykazují odchylky od prvního podrobně proměřeného modulu pouze v jednotkách procent, což může být také způsobeno nedokonalostmi při opakovaném sestavování chladicího systému. Součástí měření bylo i rámcové měření modulů s nižším výkonem než má TEC1-12709. Výsledky těchto měření jsou patrné z grafu na obrázku Obr. 2.9.



Obr. 2.9: Δt v závislosti na přidaném tepleném zatížení

Na základě hodnot z tohoto posledního měření bylo nyní možné navrhnout kaskádu Peltierových baterií tak, aby bylo možné dosáhnout co nejlepších výsledků. Tyto kaskády se obvykle navrhují z různě výkonných Peltierových baterií, přičemž baterii s nižším výkonem chladí jedna nebo více výkonnějších baterií. Z grafu na obrázku Obr. 2.9 je jasně patrné, že pokud použijeme na "chladnou" část kaskády baterii TEC1-12703 o jmenovitém tepelném výkonu 30W a do "teplé" části kaskády instalujeme baterii TEC1-12709, výsledky budou při použití stávajícího systému odvodu tepla, buď shodné nebo horší s případem použití samostatného TEC1-12703. Tato skutečnost byla ověřena i pokusným měřením, při němž byly tyto dvě baterie k sobě slepeny tepelně vodivou pastou.

Nyní se nabízely dvě následující možnosti řešení. První možnost byla zvýšení počtu nebo výkonu baterií "teplé" části kaskády, což přináší výrazný nárůst odpadního tepla a zároveň navyšuje nároky na napájecí systém. Druhou možností bylo snížit výkon baterie na "chladné" straně, s možným poklesem chladícího výkonu. S ohledem na potřebu dosáhnout téměř dvojnásobného rozdílu teplot než dosahuje současný systém, bylo výhodnější zvolit navýšení počtu baterií na "teplé" části. Energetické nároky a prudký nárůst odpadního tepla však konstrukci omezují maximálně na tři baterie TEC1-12709. Tepelný výkon TEC1-12703 (30W) se tedy rozdělí na tři části a z grafu na obrázku Obr. 2.9 můžeme tedy odečíst Δt pro TEC1-1709 18°C a pro tepelně nezatížené TEC-12703 pak 29°C. Prostým součtem tedy získáme dosažitelný rozdíl 47 °C.

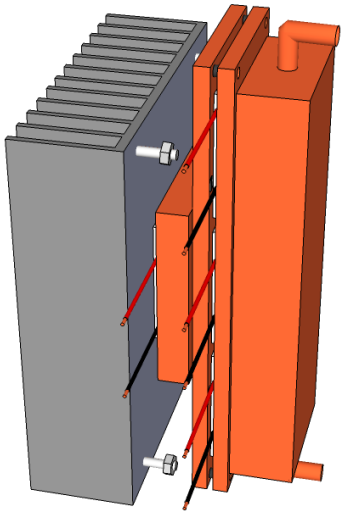
Budeme-li uvažovat teplotu okolí 25°C a požadovanou teplotu v komoře -20°C zjistíme, že systém pro odvod odpadního tepla by musel pracovat s oteplením pouze 2°C/300W. Konstrukce takového systému by byla pravděpodobně velmi objemná a také finančně nákladná, proto je nutné zvážit použití méně výkonné baterie na "chladné" části kaskády nebo ověřit vliv PWM modulace na stávající baterii (TEC1-12703).

3 Konstrukce finální komory

S rozhodnutím využití kaskády Peltierových baterií vznikl požadavek na provedení množství měření k ověření chování a vlastností baterií organizovaných v kaskádě. Do této chvíle užívaná testovací komora (obrázek Obr. 2.6) a její vodní chlazení však neumožňují testování na kaskádě, ve které by figurovala více než jedna baterie na vrstvu. Z tohoto důvodu bylo nutné zkonstruovat novou chladící komoru a vodní výměník pro chlazení více baterií. Jelikož se užití kaskády v této chvíli jevilo jako nezbytné, bylo výhodné realizovat tuto komoru tak aby mohla být použita jakožto finální verze.

3.1 Chlazení

Prvním krokem návrhu komory byla konstrukce chladící částí. Tato část je konstruována převážně z mědi a skládá se z několika dílčích částí. Postupujeme-li od vnitřní strany po vnější, následují konstrukční celky po sobě v následujícím pořadí. Vnitřní ventilátor (zajišťuje cirkulaci vzduchu uvnitř komory), vnitřní hliníkový chladič (odvod tepla z komory), Peltierův článek s nižším příkonem, 10mm silná měděná deska (průchod vnitřní stěnou komory), 5mm silná měděná deska s plochou pro tři Peltierovy baterie a nakonec vodní výměník tepla. Přesné prostorové uspořádání je pak patrné z modelu na obrázku Obr. 3.1.

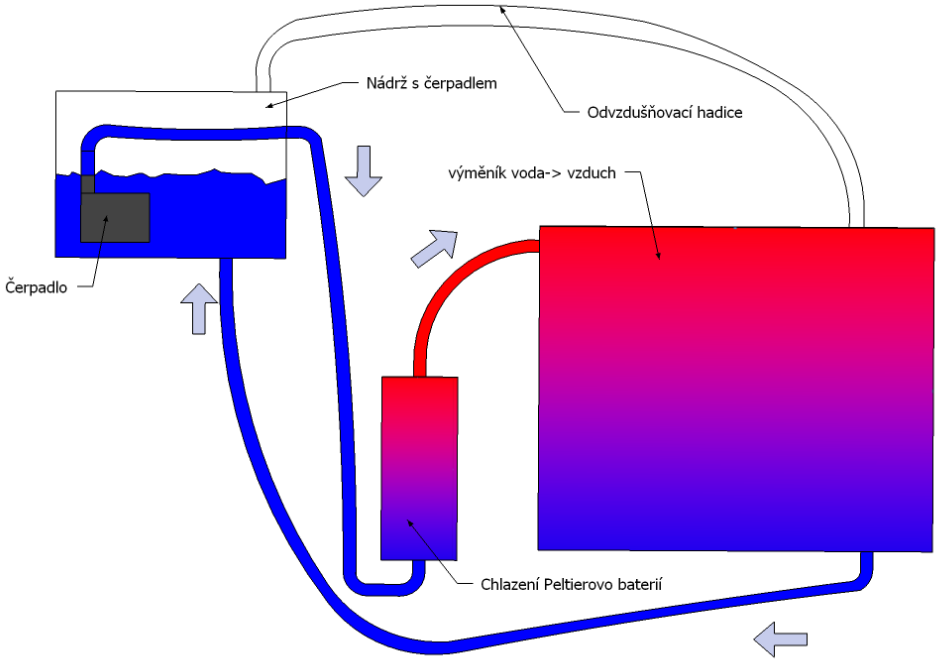


Obr. 3.1: Konstrukce chladícího bloku

Další nedílnou součástí chladicího systému je tepelný výměník voda/vzduch. Konstrukce dostatečně účinného výměníku by byla velice finančně náročná, proto se jako optimální řešení ukázalo využití starého mosazného chladiče z vyřazeného motorového vozidla. Pro využití v projektu byl chladič kompletně vyčištěn a vybaven novým krytem a dvojící ventilátorů 120mm. Takto upravený chladič by měl zajistit dostatečně účinné chlazení s minimálním nárůstem teploty.

Poslední částí chladicího systému je nádoba pro umístění oběhového čerpadla. S ohledem na minimalizaci nákladů bylo ke konstrukci využito levných kuchyňských dóz, které byly uzpůsobeny pro použití již dříve zmíněného oběhového čerpadla pro pokojovou fontánu.

Celkové schematické vyjádření vzájemného propojení dílčích bloků je pak patrné ze schématu na obrázku Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Schématický diagram chladicího systému

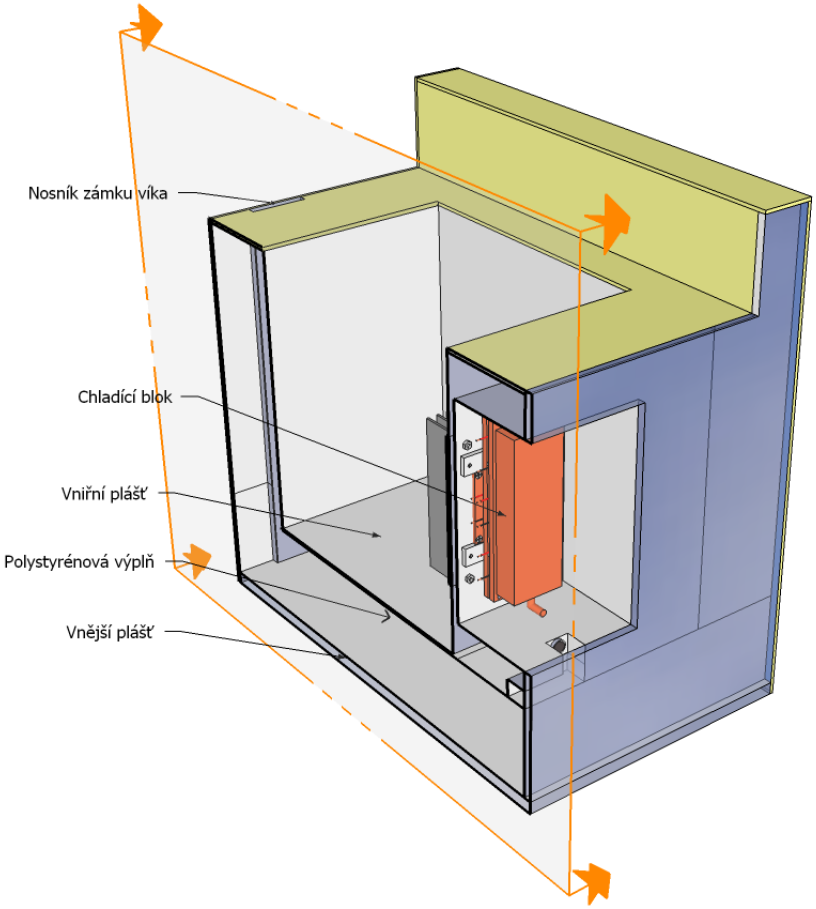
3.2 Konstrukce komory

Samotnou komoru tvoří dva pláště, vnitřní a vnější. Vnitřní plášť krom zadní stěny je tvořen z tvrzeného polystyrenu o tloušťce 3mm, zadní stěnu, nesoucí chladící blok, pak tvoří plexisklo o tloušťce 10mm. Na vnitřní plášť byly pomocí polyuretanové pěny instalovány pěnové polystyrenové izolační desky. V původním návrhu měly tyto desky mít tloušťku pouze 5cm avšak s ohledem na velmi nízký chladící výkon Peltierových baterií, byla použita izolace s tloušťkou 8cm. Tepelnou ztrátovost takovéto konstrukce (P_{mzk}) je pak možné vyjádřit pomocí vztahu

$$P_{mzk} = \lambda \cdot S_{VK} \cdot \frac{T_{roz}}{d} = 0{,}04 \cdot 0{,}24 \cdot \frac{45}{0{,}08} = 5{,}4\ 8{,}64W \quad \left[W; {}^{W}/_{m \cdot {}^{\circ}C,}\, m^2, {}^{\circ}C, m\right], \qquad (3.1)$$

kde λ představuje tepelnou vodivost (pro pěnový polystyren odpovídá 0,04 $W \cdot m^{-1} \cdot {}^{\circ}K^{-1}$[6]), S_{VK} odpovídá vnitřnímu povrchu komory, T_{roz} tepelný spád (při -20°C v komoře a 25 °C v okolí) a d sílu vložených desek. Oproti původnímu návrhu tedy činí úspora 3,2W.

Na polystyrenové desky pak byl, opět pomocí polyuretanové pěny, instalován vnější plášť. Dno a zadní stěna tohoto pláště jsou tvořeny z 13mm silného plexiskla, čímž je zaručena celková robustnost konstrukce. Zbytek pláště pak tvoří 3mm silné desky z PVC, jejichž účel je především zabránit "drolení a pomačkání" polystyrenové izolace. Konstrukční uspořádání komory je znázorněno na následujícím řezu (obrázek Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Konstrukce komory

Další částí konstrukce jsou hliníkové nosníky našroubované do dna komory. Tyto nosníky slouží k uchycení masivního mosazného výměníku voda/vzduch. Celý systém je zkonstruován tak, aby bylo možné vyměnit Peltierovy baterie bez nutnosti vypuštění chladicí kapaliny, což usnadňuje měření různých konfigurací chladící kaskády. Výsledná konstrukce je pak patrná na obrázcích Obr. 3.4, Obr. 3.5.

Obr. 3.4: Pohled na předek komory

Obr. 3.5: Pohled na zadní část komory

4 Návrh hardwaru

4.1 Výkonová část

Základním prvkem výkonového systému je napájecí zdroj, schopný dodat přibližně 26A při napětí 12V. Z ekonomického hlediska se v prvotní fázi vývoje jevilo výhodné využití jednoho nebo více počítačových zdrojů. Toto řešení se po prozkoumání několika starších zdrojů nakonec neukázalo jako příliš vhodné, neboť většina počítačových zdrojů je příliš přizpůsobena jejich původnímu účelu a aby bylo možné je využít, bylo by nutné znovu navrhnout celou jejich sekundární část. Jakožto ekonomicky výhodné východisko se nakonec ukázalo využití průmyslového spínaného zdroje s výkonem 350W (12V/30A), jehož cena (730 Kč) odpovídá přibližně ceně dostatečně výkonného počítačového zdroje.

Dalším logickým krokem byl návrh a realizace silových ovládacích prvků. Aby bylo možné zahájit návrh, bylo nutné stanovit požadavky na řídící moduly. Z obrázku Obr. 3.1 je patrné, že ovládací soustava musí zahrnovat ovládání pro tři baterie TEC1-12709 (90W) a jednu baterii TEC1- 12703 (30W).

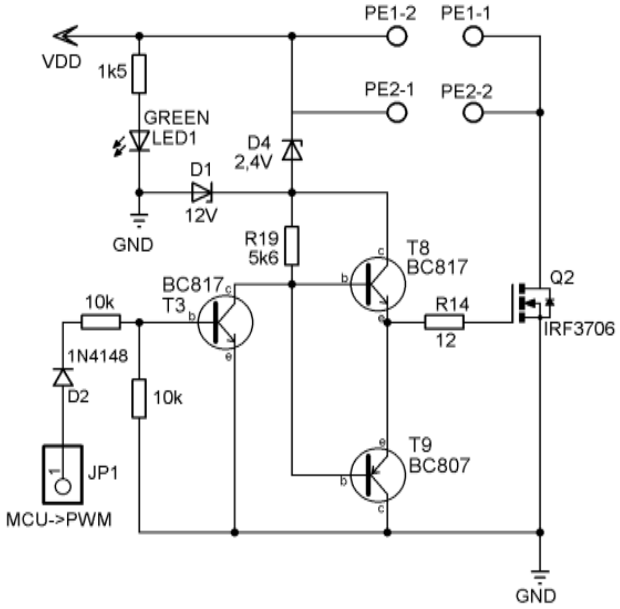
Podle informací dostupných od výrobce Peltierových baterií, by pro optimální účinnost regulace bylo ideální zkonstruovat řízený zdroj proudu. Avšak konstrukce proudového regulátoru na takto vysoký výkon by byla velmi komplikovaná a finančně nákladná. Proto bylo nakonec rozhodnuto o použití, v praxi často užívané, PWM regulace. Dalším požadavkem na ovládací systém je nutnost změny polarity napájecího napětí na ovládaných Peltierových bateriích. V praxi tato funkce umožní temperovat komoru na teploty vyšší než je teplota okolí. K tomuto účelu je možné použít jednak relé, nebo navrhnout elektronický H-můstek. Po důkladném zvážení, bylo rozhodnuto o využití H-můstku. Důvodů, proč byl zvolen H-můstek, bylo několik. Prvním důvodem byla, v době konstrukce, neznámá frekvence přepínání polarizace, druhým důvodem byla celková užitnost návrhu (100W H-můstek na 12V najde uplatnění i v dalších projektech).

Posledním krokem byla optimalizace požadavků. Praktickou zkouškou bylo ověřeno, že v případě potřeby temperovat komoru na vyšší teplotu, stačí zajistit změnu polarity napájení spodní baterie a pouze jedné ze tří výše instalovaných, přičemž zbývající dvě baterie stačí pouze vypnout.

S ohledem na výše zmíněné skutečnosti, návrh systému vedl na konstrukci tří modulů. První a druhý modul, pro spodní baterii a horní prostřední baterii, by měl obsahovat H-můstek s možností PWM regulace (jedná se prakticky o dva totožné moduly). Třetí modul by pak měl obsahovat pouze dvojitý PWM regulovatelný spínač. Rozdělení ovládacího systému na více modulů zajistí v první řadě jednodušší opravu v případě poruchy, další nemalou výhodou pak byla možnost, využití prvního prototypu H-můstku do finální konstrukce.

4.1.1 PWM spínač

Jako první byl, pro svoji jednoduchost, navržen PWM spínač pro dvě baterie o výkonu 90W. Ke konstrukci bylo využito výkonového N-MOS tranzistoru, buzeného pomocí bipolárního emitorového sledovače. Zenerova dioda D4 pak zajišťuje snížení řídícího napětí pro unipolární tranzistory, pro zvýšení bezpečnosti byla ještě přidána Zenerova dioda D1, jejímž účelem je ochrana unipolárního tranzistoru pro případ výskytu napěťové špičky v napájení.



Obr. 4.1: PWM regulátor

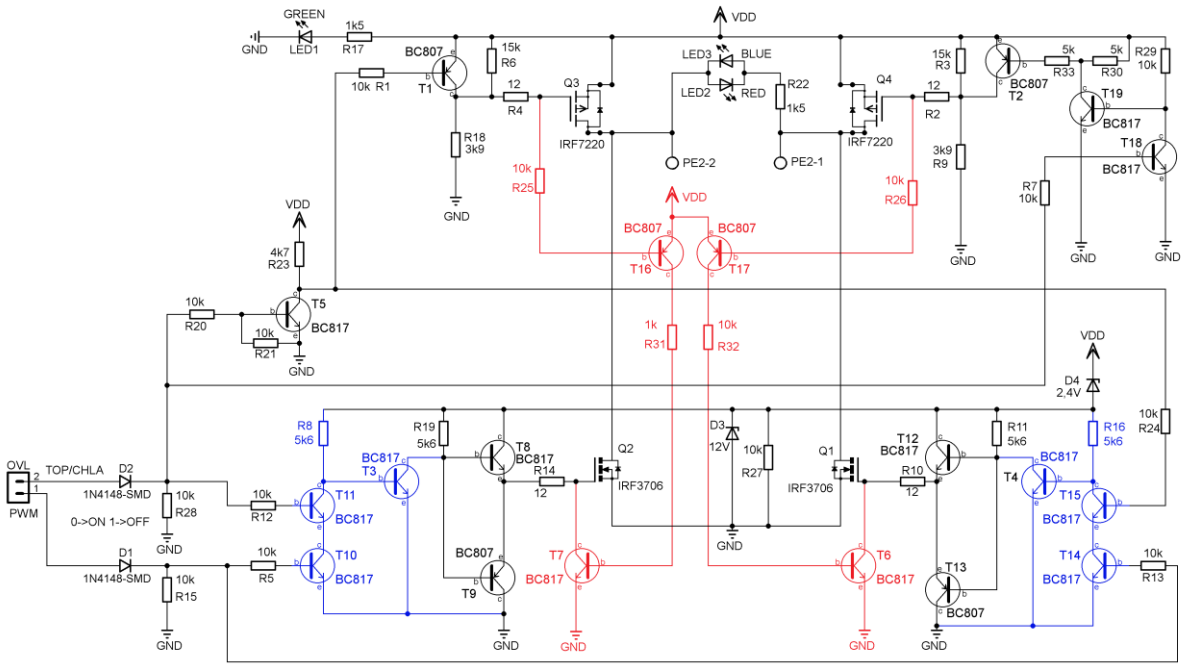
Kompletní schéma celého modulu včetně předlohy DPS, o rozměrech 40×45 mm, jsou k nahlédnutí v příloze C.

4.1.2 H-můstek

Dalším krokem byl návrh PWM řiditelného H-můstku, jehož základ tvoří dva výkonové tranzistory N-MOS a dva tranzistory P-MOS. Důvodem, proč byly použity tranzistory P-MOS, je potřeba udržet můstek trvale otevřený. Užití tranzistorů N-MOS by si vyžádalo připojení budiče a ten neumožňuje trvalé sepnutí. Celý můstek je navržen tak, aby bylo možné ovládat polaritu pouze jedním signálem pomocí pěti voltové logiky, zatímco druhý signál je zdrojem PWM-signálu. Výhodou této konstrukce je především odolnost vůči chybám v řízení a vylučuje se tak možnost „zkratování“ můstku.

Nejprve byla navrhována konstrukce založená na pěti unipolárních výkonových tranzistorech, kde čtyři tranzistory tvořily jádro H-můstku, přičemž pátý byl řízený signálem PWM a přerušoval silovou zem. Tato konstrukce se však neosvědčila, neboť rozpínáním země docházelo ke spínání nadřazených N-MOS tranzistorů v H-můstku a z neznámých příčin k napěťovým průrazům těchto tranzistorů. S ohledem na tyto komplikace bylo navrženo nové zapojení, které vyžaduje mnohem více obslužných tranzistorů, ale podstatnou měrou zvyšuje spolehlivost celkové konstrukce.

Na následujícím obrázku Obr. 4.2 je znázorněno kompletní zapojení H-můstku včetně obslužných tranzistorů. Přičemž části vyznačené v obvodu červeně zajišťují doplňkovou ochranu před „zkratováním“ můstku a části označené modře představují funkce AND umožňující využít PWM.



Obr. 4.2: Zapojení H-můstku

Slabinou této konstrukce může teoreticky být použití zmíněných P-MOS tranzistorů. Zvolený typ je instalován v pouzdře SO8, u něhož by mohl nastat problém s nedostatečným odvodem tepla. Při deklarovaném R_{ds} =0,012Ω a při spínaném proudu 9A činí ztrátový výkon téměř 1W. Do této doby provedené zkoušky však prokázaly, že tranzistory jsou schopny tuto zátěž zvládat.

Kompletní schéma celého modulu včetně předloh dvojstranné DPS, o rozměrech 55×50 mm, jsou k nahlédnutí v příloze B.

4.2 Návrh řídícího modulu

Systém, zajišťující řízení a uživatelské rozhraní, je poměrně jednoduchou záležitostí. Základem tohoto systému je procesor ATmega32. Procesor je pomocí sběrnice 1-wire připojen na řadu teplotních senzorů DS18B20, které podávají informace nejen o teplotě v komoře, ale i o dalších provozních teplotách. Užitá sběrnice je v tomto systému zapojena v režimu plného napájení, který oproti parazitnímu umožňuje lepší využití teplotních rozsahů teploměrů.

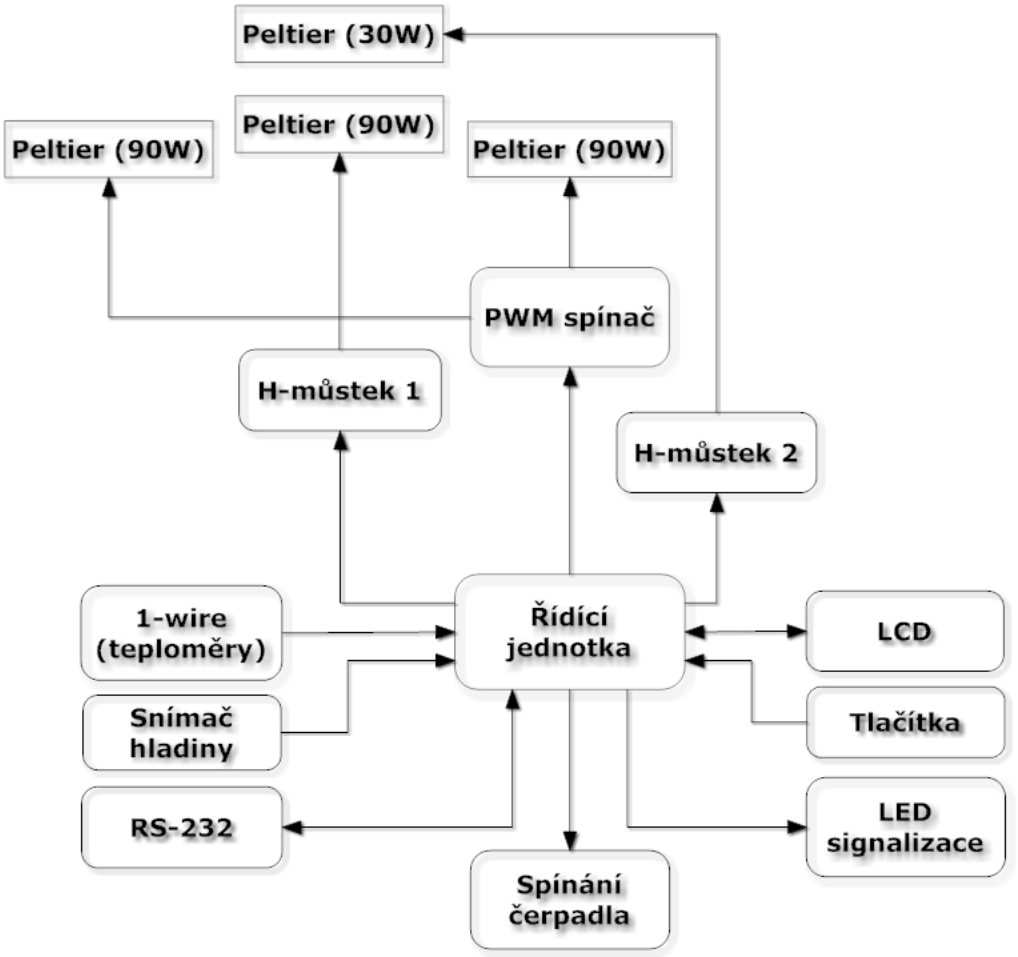
Dalším vstupním systémem je řada sedmi kláves, která je připojena přes prioritní kodér 1z8 (4532). Využití tohoto kodéru je, co se týče počtu užitých pinů, výrazně výhodnější než standardně využívané maticové zapojení.

Pro komunikaci s uživatelem pak bylo zvoleno znakové LCD o rozměrech 20x4 znaky s integrovaným řadičem. Signalizaci poruch a provozních stavů zajišťují připojené informační LED. S ohledem na nedostatečný počet výstupů bylo pro ovládání diod navrženo rozšíření počtu výstupů pomocí posuvných registrů 74HC4094. Toto rozšíření efektivně sníží počet obsazených pinů na procesoru a spolu s tím i jeho proudové namáhání. Připojení LED přímo na posuvné registry navíc umožní, za užití vhodných předřazených rezistorů, ovládat signalizační LED bez využití pomocných tranzistorů.

Součástí zapojení jsou rovněž výstupy určené ke spínání systémových ventilátorů a ovládání relé, které spíná oběhové čerpadlo.

Pro možnost komunikace komory s počítačem je systém ještě vybaven konektorem pro sériovou komunikaci, přičemž přizpůsobení napěťových úrovní je zajištěno pomocí obvodu MAX232.

Blokové schéma propojení řídicího systému s ostatními částmi zařízení je zakresleno na obrázku Obr. 4.3. Úplné obvodové schéma řídící jednotky je pak k dispozici v příloze A.



Obr. 4.3: Blokové schéma propojení řídící jednotky s okolím

5 Řídící program

Nedílnou součástí zařízení je i program pro mikroprocesor zajišťující jednak regulaci výkonu chlazení/topení a v neposlední řadě také uživatelské rozhraní pro komfortní obsluhu celého zařízení.

5.1 Struktura programu

Celý řídící program je psaný v jazyce C a je koncipován jako soustava procesů s kooperativním multitaskingem. Každý jednotlivý proces je tedy cyklicky volán ze základní funkce „main“, ve které se nevykonává žádná jiná činnost než toto volání. Veškeré procesy jsou ve své podstatě stavové automaty, které jsou obvykle tvořeny soustavou „výkonných“ a „vyčkávacích“ stavů. Většinu strojového času procesy zůstávají v některém vyčkávacím stavu, kde pouze kontrolují, zda nedošlo k události, která by vyžadovala jich zásah. Takováto událost může být buď vypršení času, nebo reakce na jednobitový příznak. Původce jednobitového příznaku může být jednak přerušení nebo zpráva od jiného procesu.

Aby bylo možné zajistit efektivní rozdělení strojového času, bylo zavedeno pravidlo pouze jedné změny stavu stavových automatů během jednoho průchodu, což sice navýší celkový čas k dokončení některých operací, avšak umožňuje to efektivnější dělení času pro ostatní procesy.

5.2 Meziprocesové komunikace

Meziprocesovou komunikaci zajišťuje soustava globálních proměnných, které obsahují provozní hodnoty (časy, teploty, nastavení….) společně s množstvím jednobitových příznaků pomocí kterých se signalizují pracovní stavy a události. Jednobitové příznaky lze prakticky rozdělit na tři skupiny. První skupina obsahuje takzvané příznaky trvalé, jedná se většinu o signalizaci pracovního stavu (příklad: nedostatek chladiva). Druhá skupina jsou pak příznaky takzvaně jednocyklové, tyto příznaky vždy nastavuje proces, pod jehož správu daný příznak spadá a nastavuje ho právě na dobu jednoho centrálního cyklu, ostatní procesy si tento příznak po tuto dobu mohou přečíst a adekvátně tak na něj reagovat. Jako příklad může posloužit následující situace: V okamžiku, kdy proces správy teploměrů změří teplotu, nastaví příznak aktualizované teploty příslušného teploměru. Ostatní procesy (regulace, zobrazení na LCD) tak mohou zaregistrovat, že teplota byla aktualizována a mohou tak adekvátně reagovat bez zbytečné režie. Jakmile proběhnou všechny procesy a je znovu volán proces správy teploměrů, dojde k vynulování příznaku až do dalšího měření teploty. Třetí skupinou jsou příznaky „krátké“. Tyto příznaky jsou určeny k signalizaci obslouženého přerušení a jsou nastavovány v přerušení a nulovány okamžitě, jakmile je zavolán proces, pod který konkrétní přerušení náleží.

Důvodem, proč byly „krátké“ příznaky zavedeny, je optimalizace kódu. Díky těmto příznakům je v přerušení pouze provedeno nezbytné ošetření, jako je například uložení přijímacího bufferu UART komunikace a nastaven příznak. Příslušný proces, pod nějž důvod přerušení spadá, pak zajistí zpracování v přerušení uložených dat a příznak vynuluje.

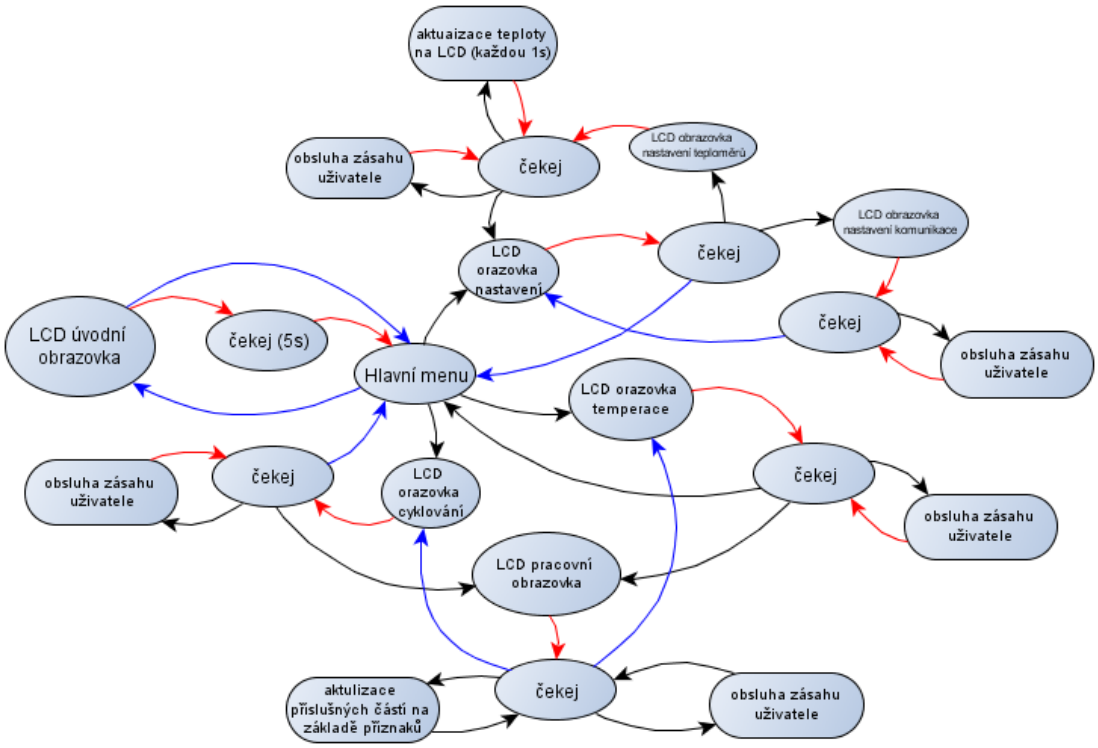
5.3 Procesy

Celkově systém obsahuje sedm procesů: Správce LCD, kontrola tlačítek, proces reálného času, měření teploty, signalizaci stavů, sériovou komunikaci a regulační proces. Veškeré procesy jsou

koncipovány tak, aby doba jednoho průchodu procesem nepřekročila 1,5 ms, což je zajištěno jednak rozdělením časově náročnějších úloh na více průchodů procesem a samozřejmě také nahrazením vyčkávacích smyček delších než 100us průchodovými částmi které přenechávají vyčkávací čas ostatním procesům. Podrobnější rozbor procesů je uveden v následující části práce.

5.3.1 Proces Správa LCD

Nejkomplexnějším procesem z celého programu je právě tento proces, jehož účelem je kompletní obsluha znakového LCD a zajištění rozhraní mezi uživatelem a systémem. Proces je tvořen rozsáhlým stavovým automatem a je ovládán příznakovými bity, které nastavují ostatní procesy. Základní mapa jeho stavů je zobrazena na obrázku Obr. 5.1, kde červeně označené přechody označují automatický přechod do jiného stavu v okamžiku dokončení stavu stávajícího, modré přechody označují návraty do předchozího stavu pomocí klávesy zpět a nakonec černé přechody označují přechody do jiného stavu buď na základě zásahu uživatele, nebo vnějšího příznaku.



Obr. 5.1: Přehled pracovních stavů procesu Správce LCD

S ohledem na fakt, že komunikace s řadičem LCD je poměrně pomalou záležitostí, je proces správy LCD koncipován tak, aby minimalizoval množství zapisovaných dat. Této minimalizace je docíleno samostatným aktualizováním jednotlivých proměnných na základě vstupního příznaku o jejich změně. V důsledku tohoto opatření tak obvykle při průchodu procesem dochází k zápisu pouze několika znaků, což přispívá k plynulosti provozu celého systému.

5.3.2 Proces sériové komunikace

Dalším návrhově zajímavým procesem je proces zajišťující komunikaci pomocí rozhraní UART. Tento proces využívá v procesoru vestavěného modulu UART. Režim jeho činnosti závislý na volbě uživatele, přičemž jeho účelem je odesílat informace o zvolených pracovních teplotách a zároveň v případě, že je tato funkce aktivována, přijímat a dekódovat příkazy, pomocí nichž je možné komoru plně ovládat.

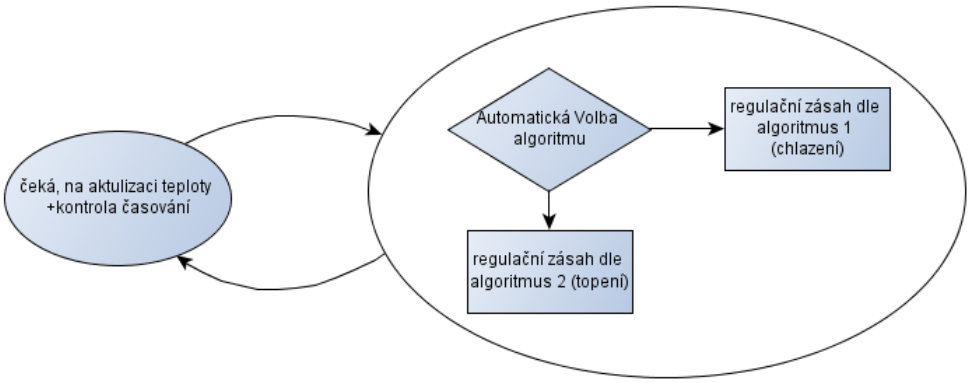
Ze své podstaty je tedy tento proces členěn na dvě základní části. První částí je část vysílací, jejíž součástí je buffer o velikost 20 znaků. Tato část průběžně sleduje příznaky o aktualizaci teploty a v okamžiku, kdy detekuje shodu s některou z uživatelem zvolených teplot, zpracuje teploty do formy textového řetězce, které uloží do vysílacího bufferu. Data jsou poté vysílána po jednom znaku a to tak, že každý průchod procesem odpovídá testu, zda je hardwarový vysílací buffer prázdný a pokud ano, tak nahrání dalšího znaku. Tento postup se opakuje, dokud nejsou odvysílány všechny znaky ze softwarového bufferu.

Druhou částí procesu sériové komunikace je přijímací algoritmus. Tato část využívá kruhový softwarový buffer o velikosti 16 znaků. Tento buffer je automaticky plněn v přerušení od UART modulu a jeho vyprázdnění je realizováno v tomto procesu. Pokud přijímací algoritmus zjistí, že jsou v zásobníku více jak tři znaky, provede analýzu, zda některý ze znaků neodpovídá počátku některého z akceptovatelných příkazů, znaky před počátkem jsou automaticky z bufferu odstraněny. Pokud během analýzy dojde k neshodě oproti očekávanému řetězci, dojde opět odstranění znaků až k této neshodě. Pokud by z nějakých důvodů došlo k zaplnění celého bufferu, jsou veškeré příchozí znaky zahazovány až do doby, dokud se buffer neuvolní. Tato situace by však neměla nastat, neboť v rámci testování byl za plného provozu opakovaně odesílán na zařízení náhodně vygenerovaný soubor a v žádném z pokusů nedošlo k úplnému zaplnění bufferu.

5.3.3 Proces regulace

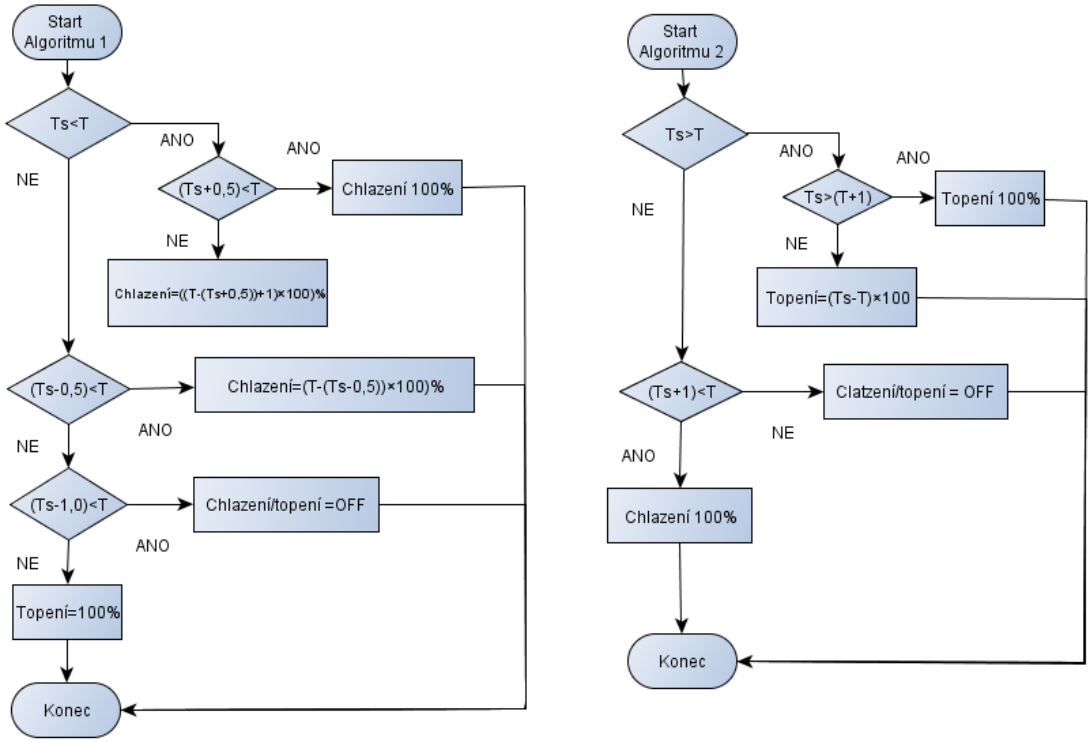
Stěžejním procesem celého zařízení je proces regulace teploty. S ohledem na povahu regulované veličiny, a setrvačnost soustavy by pro přesnou regulaci bylo nejlepší využít regulátor proporcionálně integračně derivační (PID). Vytvoření regulátoru typu PID by však bylo po programové stránce velmi náročné, další komplikaci by pak představovalo správné nastavení regulátoru tak, aby nedošlo k rozkmitání regulace, neboť správné vyvážení jednotlivých složek PID regulátoru je velmi obtížnou záležitostí. Aby se předešlo těmto komplikacím, byla zvolena pouze proporcionální regulace.

Samotný regulační proces je koncipován tak, aby regulační zásahy prováděl pouze na základě některého ze tří podnětů. Prvním podnětem je aktualizace teploty, druhým podnětem je uplynutí stanoveného času a třetím podnětem je zásah uživatele. Samotné regulační zásahy jsou pak realizovány na základě dvou regulačních algoritmů (viz obrázek. Obr. 5.2).

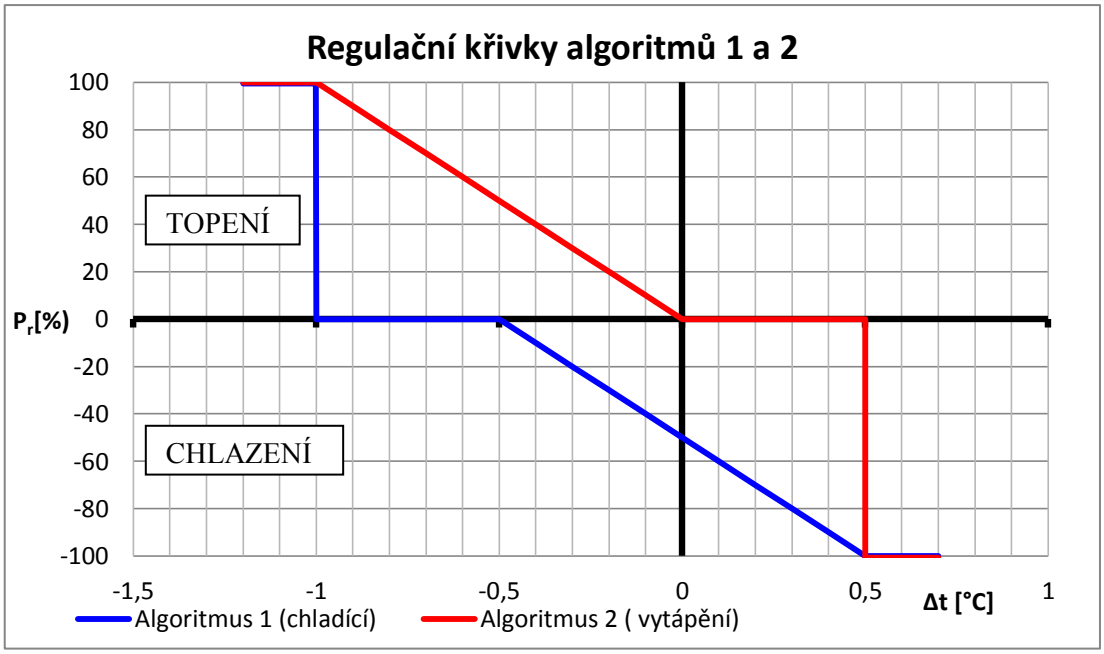


Obr. 5.2: Struktura regulačního procesu

Volba dvou regulačních algoritmů byla nezbytná s ohledem na odlišné projevy topení a chlazení v rámci obvyklých provozních podmínek. Algoritmus číslo jedna je optimalizován pro regulaci chlazení a algoritmus číslo dva pro funkci vytápění. Porovnání vývojových diagramů obou algoritmů je patrné z obrázku Obr. 5.3. Jejich výstupní projevy jsou pak znázorněny v grafu na obrázku Obr. 5.4, kde kladný relativní výkon odpovídá topení, záporný pak chlazení.



Obr. 5.3: Vývojový diagram a výstupní projev regulačních algoritmů

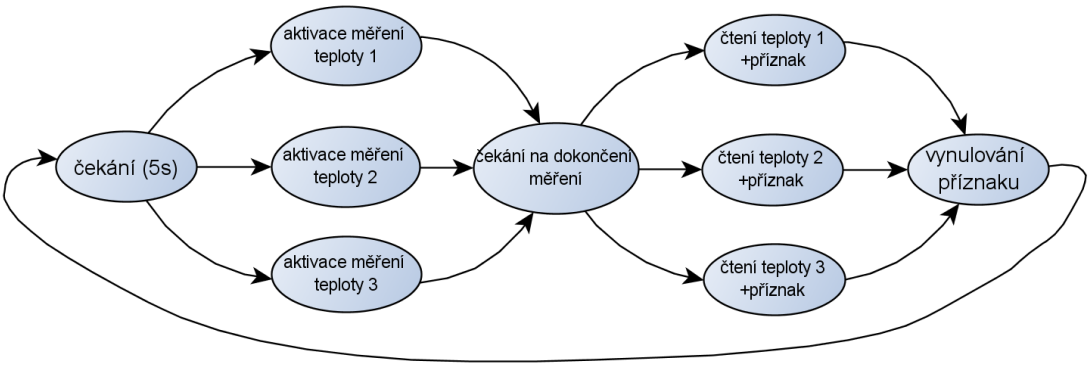


Obr. 5.4: Porovnání regulačních křivek algoritmu 1 a 2

5.3.4 Proces měření teploty

Proces měření teploty je navržen tak, aby přes poměrně nízkou rychlost použité sběrnice 1-wire nezpůsoboval přílišné zpomalení ostatních procesů. Za tímto účelem je proces rozdělen na několik dílčích úseků, z nichž je vždy při jednom průchodu vykonán pouze jeden. Co se týče vyčkávání na dokončení měření, bylo původně využíváno testování busy flag příznaku, avšak to se nakonec ukázalo jako velmi časově náročné, a proto bylo nahrazeno standartním průchodovým vyčkáváním o délce 850ms.

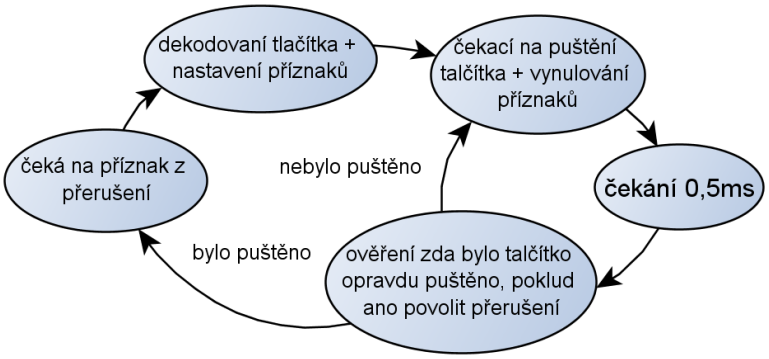
Měření teploty z různých senzorů pak probíhá postupně v pětisekundových cyklech, kdy v každém cyklu je změřena pouze jedna teplota. Perioda vzorkování teploty je tedy pro každý teploměr 15s, což je pro účely komory zcela postačující i v případě, že dojde k chybě při vyčítání (chyba je automaticky detekována kontrolou CRC) a teplota je tak aktualizována až za dalších 15s. Grafické znázornění pracovního diagramu procesu je k dispozici na obrázku Obr. 5.5.



Obr. 5.5: Diagram procesu měření teploty

5.3.5 Kontrola tlačítek

Proces detekce stisknutého tlačítka je velice jednoduchou záležitostí. Absolutní většinu svého strojového času čeká proces na příznak přerušení. V okamžiku, kdy je tento příznak detekován, proces dekóduje ze záznamu stavu portu při přerušení stav tlačítek, nastaví na dobu jednoho průchodu zprávu všem procesům, která obsahuje číslo stisknutého tlačítka a poté vyčká na sestupnou hranu. Jakmile je tato hrana bezpečně detekována, povolí opět vnější přerušení a systém je opět ve výchozím stavu. Celý tento postup je přehledně znázorněn v diagramu na obrázku Obr. 5.6.



Obr. 5.6: Diagram detekce tlačítek

5.3.6 Procesy pro signalizaci stavů a reálného času

Oba tyto procesy jsou velmi jednoduché, proto jim nebyla vyčleněna vlastní podkapitola.

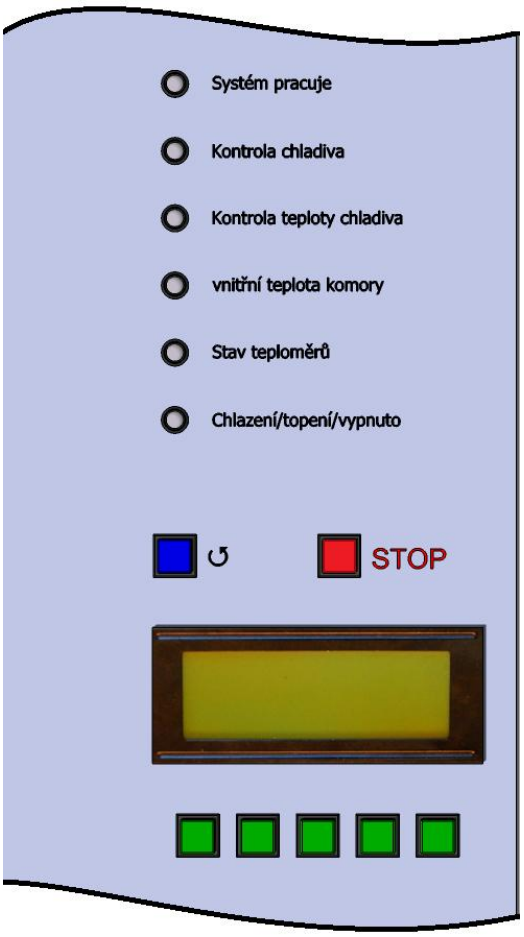
Proces signalizace stavů zajišťuje pouze cyklickou kontrolu provozních parametrů (chyby teploměrů, teploty chladiva…). Výsledky těchto kontrol jednak sděluje uživateli prostřednictvím informačních LED a zároveň vydává vnitřní příkazy, které mohou v případě některých stavů i zastavit činnost komory.

Proces reálného času při každém průběhu kontroluje svůj příznak aktivace, a pokud je aktivován, zajišťuje inkrementaci příslušné proměnné reálného času. Frekvence inkrementace je odvozena od systémového času, od něhož jsou odvozeny i veškeré časové operace, u kterých postačuje rozlišení 100us. Systémový čas představuje dvoubajtová proměnná, která je na základě přesného nastavení před-děličky a komparačního registru inkrementována v přerušení každých 100us.

6 Uživatelské rozhraní

6.1 Prostorové uspořádání a technologie ovládání

Nedílnou součástí zařízení je i uživatelské rozhraní. Hlavním úkolem uživatelského rozhraní je zajistit jednoduchou obsluhu celého zařízení a poskytnout uživateli informace o průběhu a výsledcích měření. Po úvaze o potřebných vstupech a výstupech zařízení, byla stanovena nutnost užití znakového displeje o minimálním rozlišení 20x4 znaky a požadavek na 5 multifunkčních tlačítek (M1 – M5), jejichž funkce se mění v závislosti na aktuálním zobrazení. Dále jsou implementována dvě tlačítka s pevnou funkcí a to tlačítko ZPĚT a tlačítko STOP. Jakožto signalizace provozních stavů slouží 6 LED. Uspořádání těchto prvků je patrné obrázku Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Výřez ovládacího panelu

Krom zde prezentovaného rozhraní má uživatel ještě k dispozici sérii příkazů, pomocí nichž je možné komoru ovládat prostřednictvím sériové linky, kompletní výpis příkazů je k dispozici v tabulce Tab. 6.1.

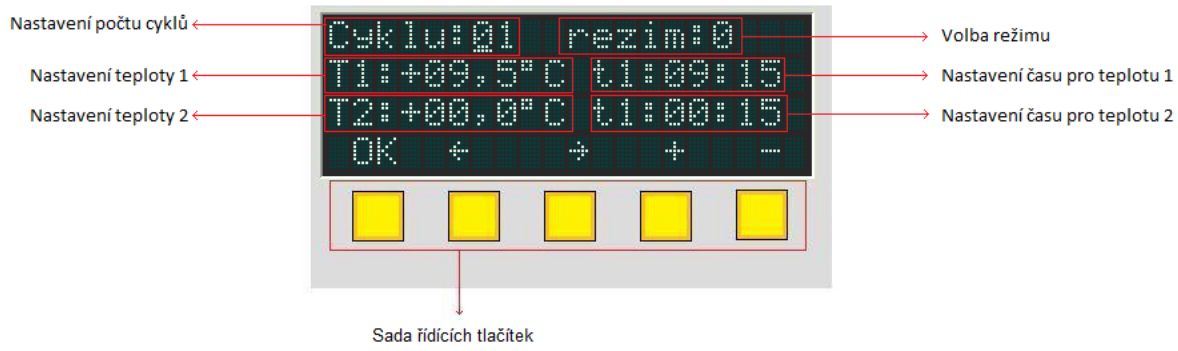
Tab. 6.1: Přehled podporovaných příkazů

Příkaz	MIN	MAX	Popis:
T1=	-10,0	60,0	nastavení teploty T1 (formát: 00,0)
T2=	-10,0	60,0	nastavení teploty T2 (formát: 00,0)
t1=	00:00	99:59	nastavení času t1 (formát: 00:00 [hh:mm])
t2=	00:00	99:59	nastavení času t2 (formát: 00:00 [hh:mm])
R=	1	2	nastavení režimu
C=	00	99	nastavení počtu cyklů
START_CYK	-		spustí režim cyklování
START_TEM	-		spustí režim temperování
STOP	-		Ukončí činnost temperování
COM_P_OFF	-		vypne příjem příkazů (opětovné zapnutí je možné pouze manuálně)
COM_V=	0	4	nastaví režim vysílání dat (0→nic, 1→vše, 2→pouze vnitřní teplota, 3→ pouze teplota vnitřního chladiče, 4→pouze teplota chladiva)

6.2 Funkce komory

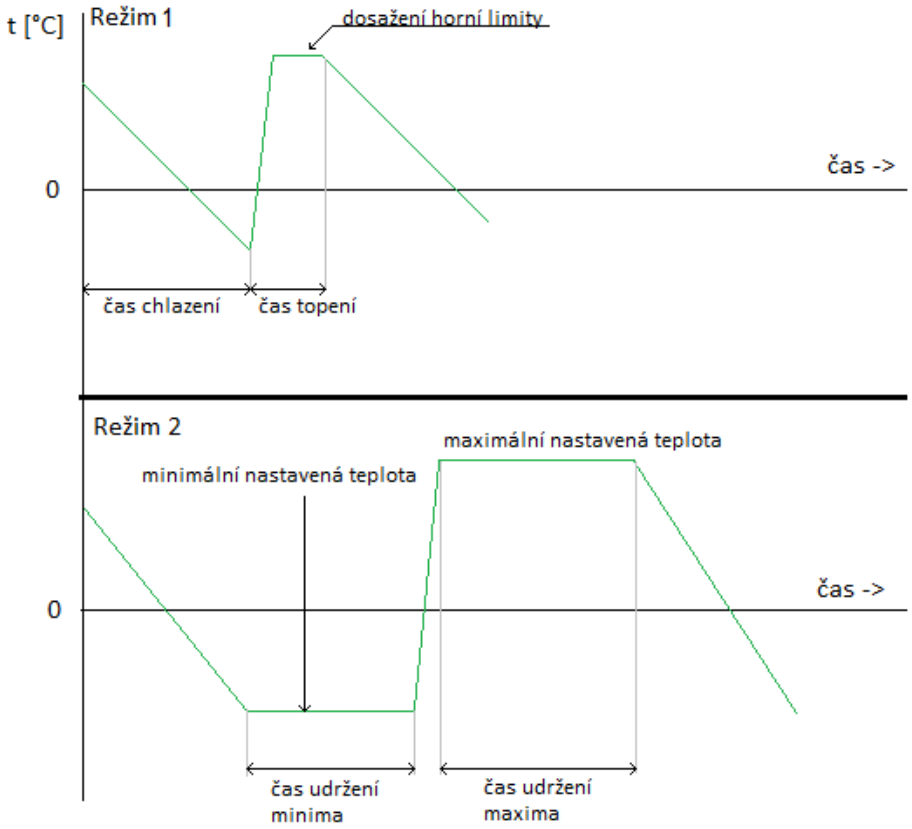
Celý řídicí systém komory uživateli poskytuje dvě základní funkce. První funkcí je udržování konstantní teploty, v této funkci si uživatel zvolí požadovanou teplotu, čas a pracovní režim.

Druhou základní funkcí je funkce cyklování. V rámci této funkce uživatel zadává dvě teploty, dva časy, počet cyklů a stejně jako v předcházejícím funkci konstantní teploty, má k dispozici volbu pracovního režimu. Ukázka obrazovky nastavení režimu cyklování je k dispozici na obrázku Obr. 6.2. Kompletní mapa uživatelských obrazovek je pak ke zhlédnutí v příloze D.



Obr. 6.2: Ukázka nastavení parametrů pro režim cyklování

Co se týče výše zmiňované volby pracovního režimu, tak jejím účelem je umožnit uživateli zvolit ze dvou způsobů měření času. V prvním režimu je počítání času zahájeno, až když se teplota v komoře přiblíží zvolené teplotě s odchylkou menší než 1°C, zatímco v druhém režimu je měření času zahájeno v okamžiku, kdy je systém aktivován. Porovnání teplotních průběhů obou režimů je pak patrné z obrázku Obr. 6.3.

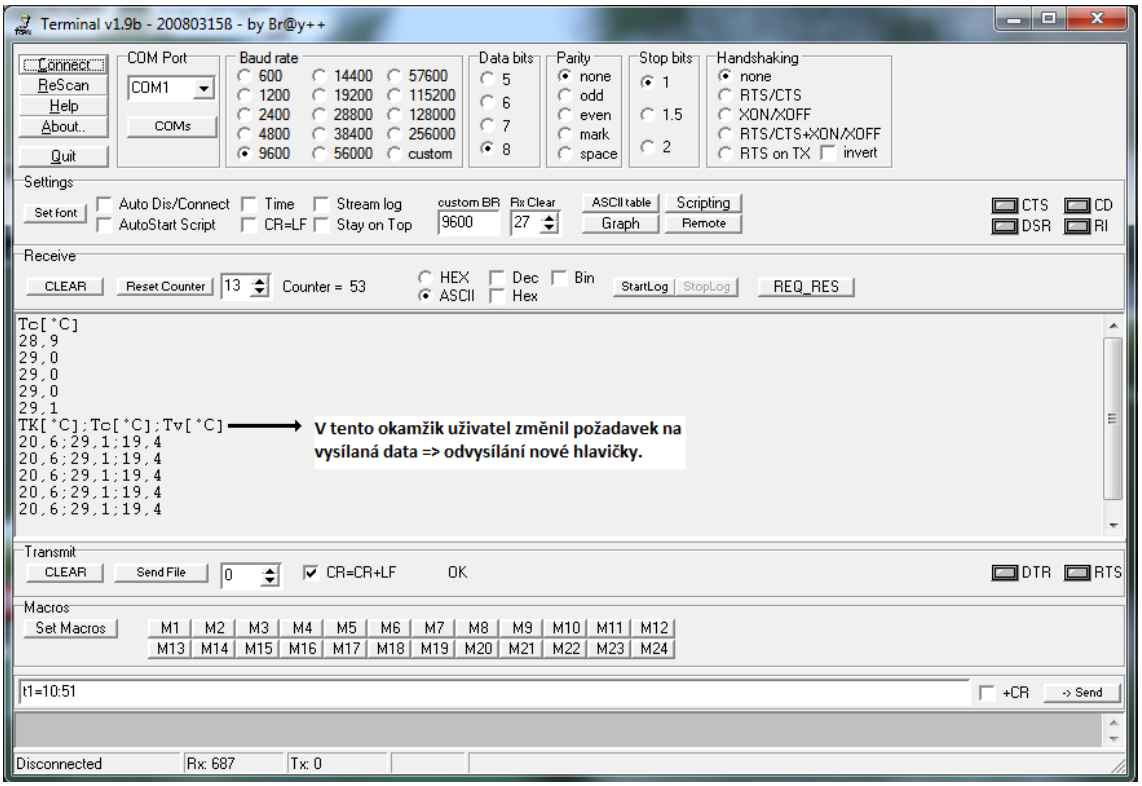


Obr. 6.3: Rozdíly mezi režimem jedna a režimem dva

Další uživatelskou funkcí, i když ji v současné verzi softwaru uživatel nemůže ovlivnit, je tepelná ochrana testovaného subjektu a komory samotné před přehřátím po skončení nastaveného programu. Princip ochrany je velice prostý. V případě, že je dokončen program a nebylo stisknuto tlačítko STOP nebo zadán příkaz k zahájení nového programu, řídící program pomocí chladicího systému zabraňuje vzestupu teploty v komoře nad 30°C, v případě že program skončí na maximální teplotě (60°C), je rovněž tento systém aktivován. Tento ochranný prvek byl zaveden, aby při testování subjektu se ztrátovým výkonem, nemusel uživatel „hlídat“ konec programu.

Pro případ, že by bylo nutné provést výměnu čidel teploty (DS18B20), je komora sice vybavena automatickou detekcí, avšak není schopna sama spojit čidla s jejich umístěním v komoře. Z toho důvodu je komora rovněž vybavena možností ručního přiřazení příslušných čidel k jejich umístění. Postup pro tento případ je následující: zahřát čidlo (například dotekem ruky) na teplotu vyšší než mají ostatní čidla a v režimu nastavení teploměrů sledovat, které čidlo vykazuje nárůst teploty. Pomocí tlačítek pak již není problém přiřadit čidlo na příslušnou pozici. Přestože v tomto režimu jsou teploměry vzorkovány se zvýšenou frekvencí, může po vložení hodnoty trvat až tři sekundy, než se změna na LCD projeví. Příčinou je nízká rychlost sběrnice 1-wire.

Poslední položkou nastavení komory je již dříve zmíněná sériová komunikace. Uživatel si zde může aktivovat příjem příkazů po sériové lince a zároveň si zvolit, zda si přeje odesílat data o teplotě. Co se týče odesílání, má na výběr z pěti možností: žádná data, veškerá data, teplota v komoře, teplota na vnitřním chladiči, teplota chladiva. Ukázka formátu přijímaných dat je k dispozici na obrázku Obr. 6.4.

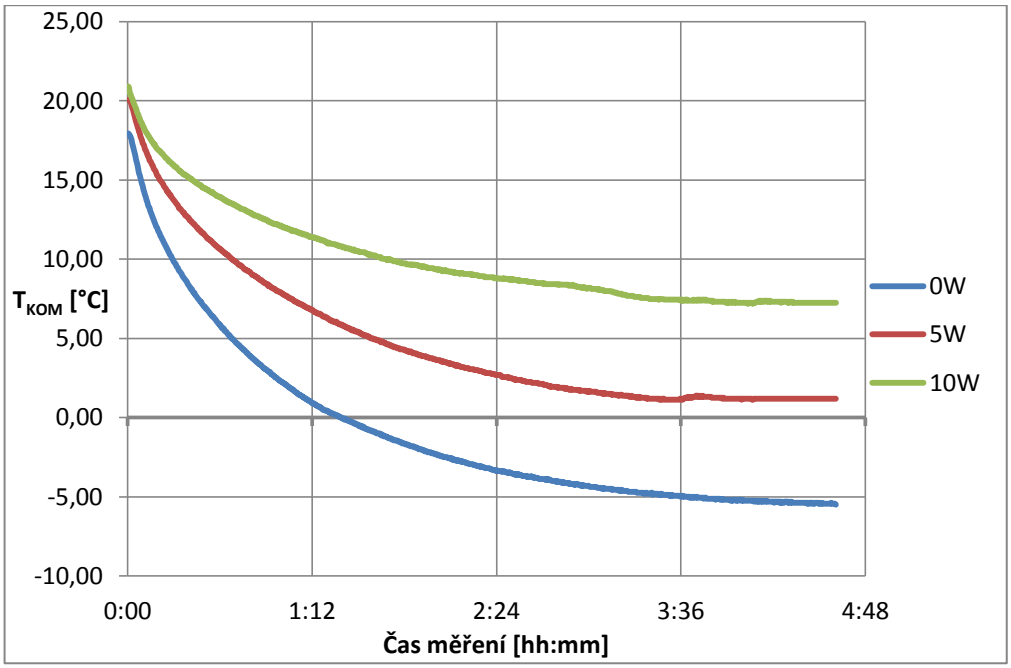


Obr. 6.4: Ukázka formátu přijímaných dat v terminálu

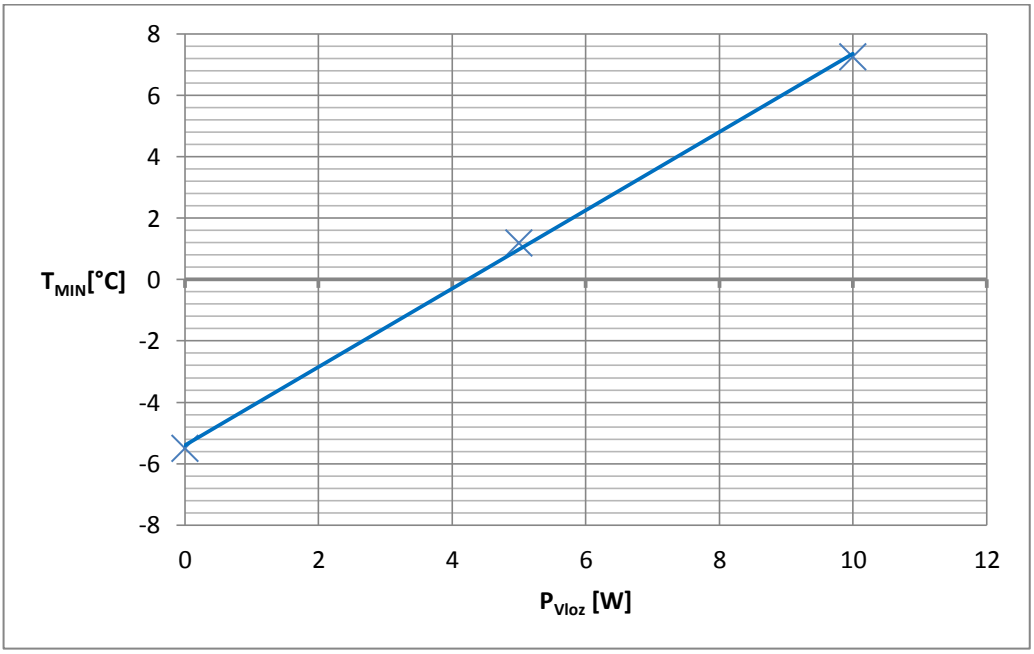
7 Změřené parametry

Poslední závěrečnou částí práce je shrnutí technických parametrů a proměření vlastností výsledné konstrukce.

Na následujícím obrázku Obr. 7.1 je znázorněn průběh teploty v komoře v závislosti na čase, při plném chladícím výkonu a pro různé vložené tepelné zátěže. Další obrázek Obr. 7.2 pak znázorňuje závislost minimální dosažitelné teploty v komoře na velkosti vložené tepelné zátěže. Všechny tyto charakteristiky byly změřeny při teplotě okolí 20°C.

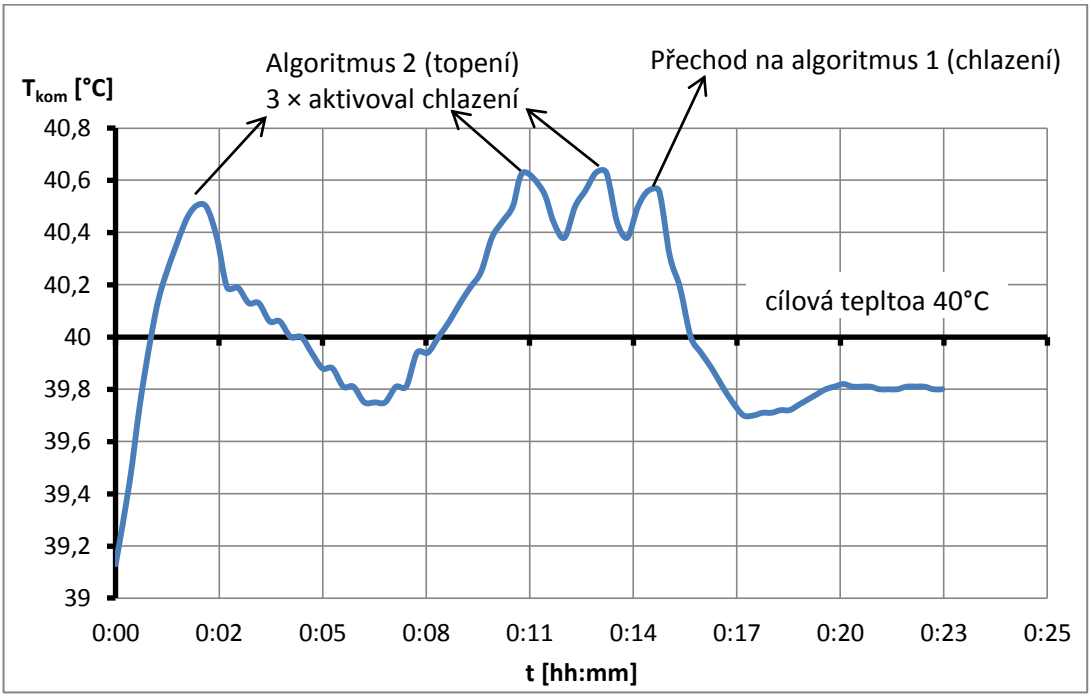


Obr. 7.1: Průběh teploty v komoře v čase při plném chladícím výkonu a různé vložené tepelné zátěži



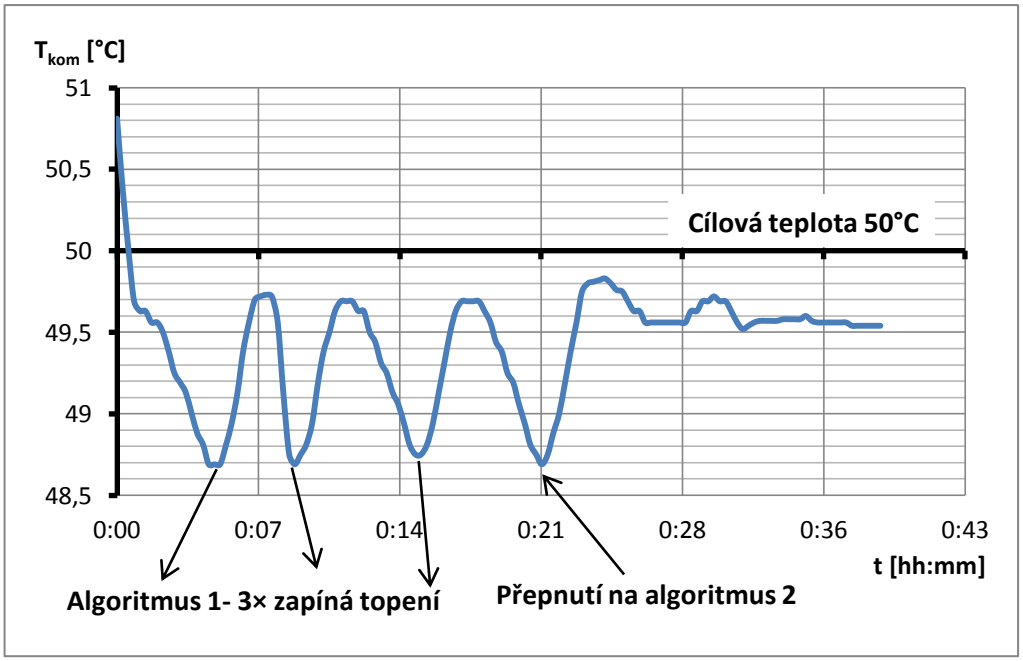
Obr. 7.2: Závislost minimální teploty v komoře na vloženém tepelném výkonu

Graf na obrázku Obr. 7.3 pak znázorňuje ukázku činnosti regulace v situaci, kdy je komora nastavena na dosažení vyšší teploty než je teplota okolí, avšak uvnitř komory je umístěn testovaný subjekt se ztrátovým výkonem 15W. V důsledku této skutečností dojde k „přetopení“ komory a je aktivováno chlazení. V grafu je pak označeno místo, kdy regulační algoritmus přepnul z algoritmu pro vytápění na algoritmus chlazení.



Obr. 7.3: Průběh teploty v komoře při přechodu regulace z algoritmu 2 na algoritmus 1

Méně obvyklý případ než na předchozím obrázku YY je znázorněn na následujícím obrázku Obr. 7.4, který znázorňuje ukázku činnosti regulačního algoritmu za situace, kdy počáteční teplota je vyšší než cílová, avšak teplota okolí je nižší než cílová teplota. V grafu je opět jako v předchozím případě znázorněno místo, kdy je regulace přepnuta z algoritmu chlazení na algoritmus pro vytápění.



Obr. 7.4: Průběh teploty v komoře při přechodu regulace z algoritmu 1 na algoritmus 2

V následující tabulce Tab. 7.1 je pak k dispozici kompletní přehled technických parametrů komory.

Tab. 7.1: Shrnutí technických parametrů testovací komory

Přehled technických parametrů:			
Hmotnost:		22,5	kg
Vnější rozměry (v×š×h):		460×543×620	mm
Vnitřní rozměry (v×š×h):		255×244×242	mm
Vnitřní objem:		15	l
Provozní náplň:		Směs do chladičů na bázi etylenglykolu, lze využít i destilovanou vodu.	
Množství náplně:		2,6	l
Elektrický příkon:		320	W
Topný výkon:		35	W
Chladicí výkon: (při vnitřní teplotě 0°C)		4,2	W
Chladicí výkon: (při vnitřní teplotě 10°C)		12,0	W
Minimální dosažitelná teplota: (při teplotě okolí 20°C)		-5	°C
Maximální dosažitelná teplota:		60	°C
Sériové rozhraní:	Symbolová rychlost:	9600	Bd
	Bitů na symbol:	8	
	Parita:	NE	
	Stop bit:	1	

8 Závěr

V rámci této práce byly pomocí výpočtů stanoveny teoretické vlastnosti Peltierových baterií. Následně byla zkonstruována malá zkušební komora, určená k ověření těchto vypočtených parametrů. Výsledky měření však prokázaly, že reálně dosažitelné parametry odpovídají maximálně 28% teoretických předpokladů. Za těchto okolností bylo nutné navrhnout nový chladicí systém, složený ze čtyř Peltierových baterií uspořádaných do dvou vrstev. S ohledem na fakt, že původní malá zkušební komora nebyla schopna testovat více vrstev baterií a konstrukce další zkušební komory by vyžadovala značné množství času a finančních prostředků, bylo nakonec rozhodnuto o konstrukci finální komory pouze na základě teoretických výpočtů, založených na informacích získaných pomocí první zkušební komory.

Z měření, která byla po konstrukci komory realizována a která jsou uvedena v kapitole sedm, je patrné, že oproti teoretickým výpočtům došlo při konstrukci komplexnějšího chladícího bloku ještě ke zhruba dalším třicetiprocentním ztrátám oproti teorii. V důsledku této skutečnosti nebylo možné dosáhnout na počátku stanovených cílů (dosáhnutí teploty -20°C v komoře při vnitřní tepelné zátěži 5W) ani s nasazením čtyř Peltierových baterií chlazených výkonným vodním chlazením.

Ze všech četných měření a pozorování, která byla během návrhu a konstrukce realizována, lze vyvodit, že užití Peltierových baterií k chlazení prostoru na nízké teploty je značně neefektivní a nelze ho tedy pro podobné konstrukce doporučit. V aplikacích podobných této se jako mnohem výhodnější jeví použití kompresorové chladící soustavy, která je sice nákladnější na pořízení, avšak poskytuje mnohem lepší parametry.

Peltierovy baterie se svou poměrně nízkou dosažitelnou účinností, avšak vysokou rekční rychlostí a jednoduchou regulací výkonu, najdou uplatnění spíše v aplikacích, ve kterých vznikne požadavek na přesné temperování tělesa s malým nebo nulovým ztrátovým výkonem, ke kterému bude Peltierova baterie přímo přiložena.

Literatura

[1] *CVUT* [online]. 2005 [cit. 2011-04-23]. Termoelektrické jevy. Dostupné z WWW: <http://moon.felk.cvut.cz/~pjv/Jak/_phys/>.

[2] GOLAB, František; KAMENČÁK, František. *Termoelektrické jevy a jejich užití*. Praha : SPN, 1975. 83 s.

[3] *HW.cz* [online]. 1999 [cit. 2011-04-23]. Peltierovy termobaterie. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART652-Peltierovy-termobaterie.html>.

[4] *HW.cz* [online]. 1999 [cit. 2011-04-25]. Peltierovy termobaterie 2. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/docs/peltier/peltiery_2.html>.

[5] *HW.cz* [online]. 1999 [cit. 2011-04-25]. Peltierovy termobaterie 3. Dostupné z WWW: <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART648-Peltierovy-termobaterie-3.html>.

[6] MIKULČÁK, Jiří . *MATEMATICKÉ, FYZIKÁLNÍ A CHEMICKÉ TABULKY*. Havlíčkův Brod : Prometheus, 2003. 206 s.

[7] *Peltier cooler* [online]. 2010 [cit. 2011-04-28]. Bkbelectronics. Dostupné z WWW: <http://www.bkbelectronics.com/pdf%20files/TEC1-127120-50.pdf>.

[8] *Satistronics* [online]. 2011 [cit. 2011-04-28]. Wholesale 40*40mm TEC. Dostupné z WWW: <http://www.satistronics.com/tec112702-thermoelectric-cooler-peltier_p1957.htmls.com/pdf%20files/TEC1-127120-50.pdf>.

[9] MIKYŠKA, L. *Termoelektrické články: určeno prachovníky v elektrotechnice., energetice, regulační technice a automatizaci*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1964. 152 s. Malá elektrotechnická knihovna. Řada elektrotechnika. lit.; sv. 24.

[10] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR*: *[měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 319 s. ISBN 80-730-0174-8.

[11] HRBÁČEK, J. *Komunikace mikrokontroléru s okolím díl 1.* Praha, 1999, 156 s. ISBN 80-860-5642-2.

[12] HRBÁČEK, Jiří. *Komunikace mikrokontroléru s okolím díl 2.* 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2000, 151 s. ISBN 80-860-5673-2

Seznam symbolů, veličin a zkratek

Q_h	Peltierův tepelný výkon
Q_J	Jouleovo teplo vnikající uvnitř Peltierova článku
Q_S	Teplo odváděné chladnou stranou Peltierova článku
Q_V	Teplo přecházející z teplé strany Peltierova článku na chladnou
α	Termoelektrického napětí Peltierova článku
T_h	Teplota teplé strany Peltierova článku
T_S	Teplota chladné strany Peltierova článku
$R_{Pč}$	Odpor Peltierova článku
I_{Pe}	Proud Peltierovým článkem
I_{Pm}	Maximální proud Peltierovým článkem
ΔT	Rozdíl teplot na Peltierově článku (studená strana oproti teplé straně)
ΔT_{max}	Maximální rozdíl teplot na Peltierově článku (studená strana oproti teplé straně) katalogová hodnota
K	Tepelné vodivost Peltierova článku
K_0	Tepelné vodivost Peltierova článku, při $\Delta T=0$
Q_0	Chladící výkon dané Peltierovy baterie, při $\Delta T=0$
Q_{ch}	Chladící výkon dané Peltierovy baterie
n	Počet Peltierových článků v dané Peltierově baterii
P_{Pe}	Tepelný výkon Peltierovy baterie
ε_{Pe}	Účinnost chlazení Peltierovy baterie
T_{ZMIN}	Minimální požadovaná teplota v komoře
T_{ZMAX}	Maximální požadovaná teplota v komoře
T_{pros}	Teplota okolí komory
T_{roz}	Teplotní spád vůči vnějšímu prostředí při minimální teplotě komory
P_{TVZ}	Ztrátový maximální ztrátový výkon testovaného objektu pro zaručení provozu
P_{mzk}	Maximální ztrátový výkon komory při minimální teplotě uvnitř komory
P_{CHP}	Požadovaný chladící výkon
ΔT_{pmax}	Požadovaný rozdíl na chladicím systému
P_{ZZK}	Ztrátový výkon zkušební komory
t_{chla}	Teplota kapaliny na vstupu chladiče
t_{zk}	Teplota uvnitř zkušební komory
ΔT_{PEL}	Teplotní rozdíl na Peltierově baterii
ΔT_{OK}	Teplotní rozdíl vnitřku komory a vnějšího prostředí
Q_{chr}	Reálný chladicí výkon Peltierovy baterie
Q_{cht}	Teoretický chladicí výkon Peltierovy baterie
Q_{chx}	Rozdíl mezi reálným a teoretickým výkonem Peltierovy baterie
P_r	Relativní výkon chlazení/topení

Seznam příloh

A Řídící jednotka **47**

A.1 Schéma zapojení řídící jednotky 47
A.2 DPS řídící jednotky strana TOP 48
A.3 DPS řídící jednotky strana BOTTOM 48
A.4 Plán osazení řídící jednotky strana TOP 49
A.5 Plán osazení řídící jednotky strana BOTTOM 49
A.6 Seznam součástek řídící jednotky 50

B H-můstek **53**

B.1 Schéma zapojení H-můstku 53
B.2 DPS H-můstku strana TOP 54
B.3 DPS H-můstku strana BOTTOM 54
B.4 Osazovací plán H-můstku strana TOP 55
B.5 Osazovací plán H-můstku strana BOTTOM (hodnoty) 55
B.6 Osazovací plán H-můstku strana BOTTOM (názvy) 56
B.7 Seznam součástek pro H-můstek 56

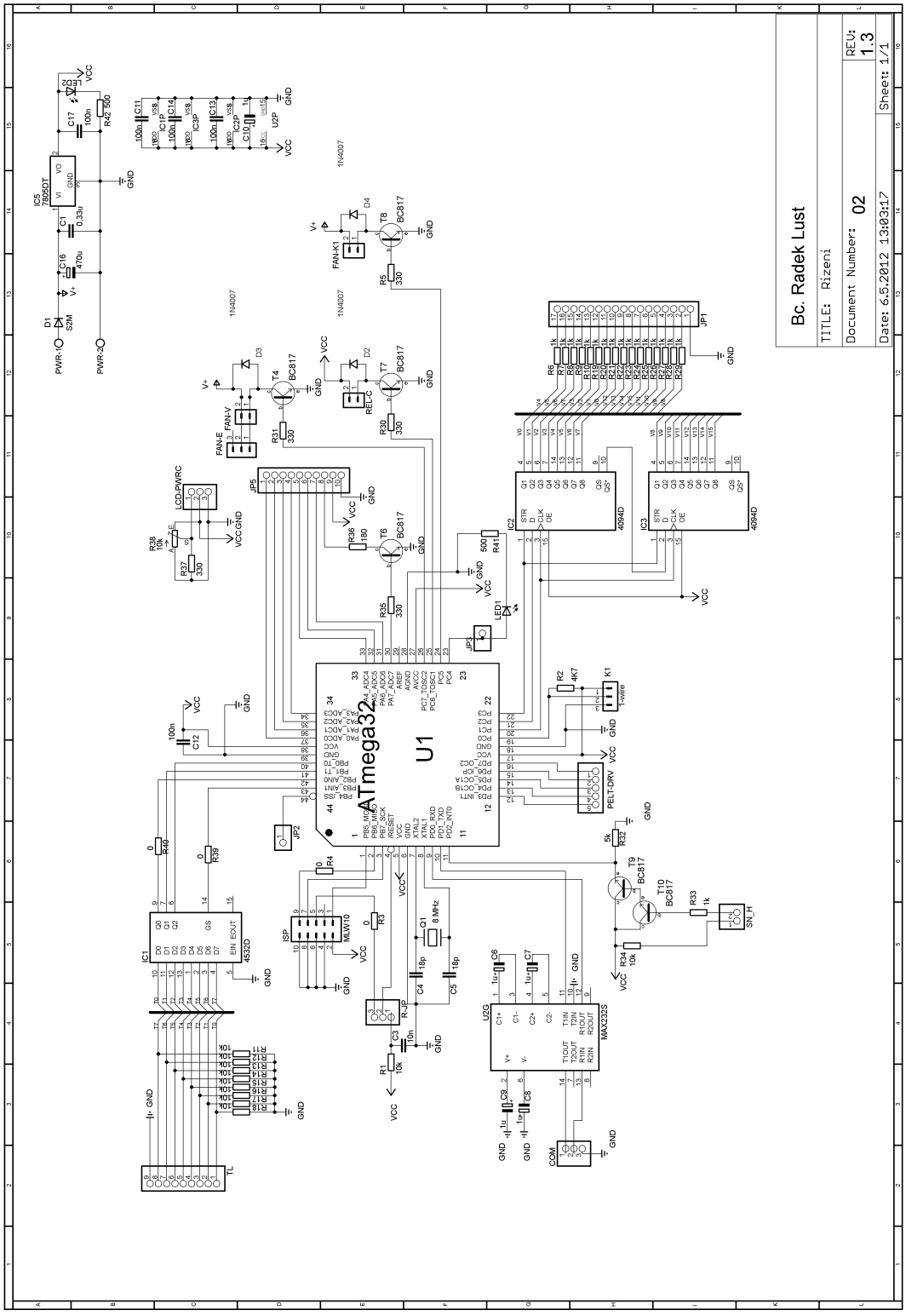
C Výkonový spínač pwm **58**

C.1 Schéma zapojení výkonového spínače 58
C.2 DPS výkonového spínače 59
C.3 Osazovací plán výkonového spínače 59
C.4 Seznam součástek výkonového spínače 60

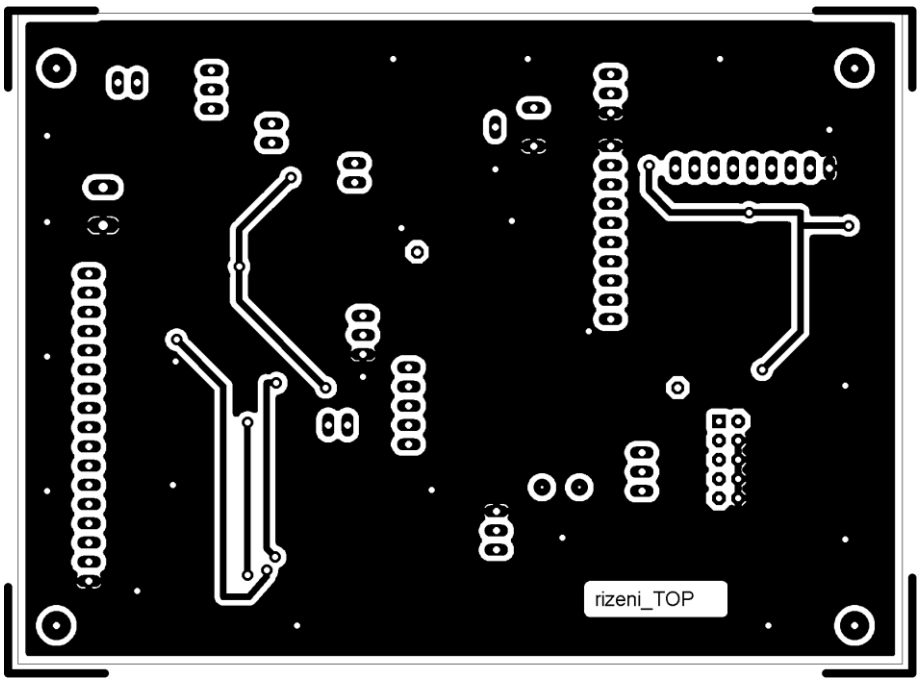
D MAPA obrazovek **61**

A ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

A.1 Schéma zapojení řídící jednotky

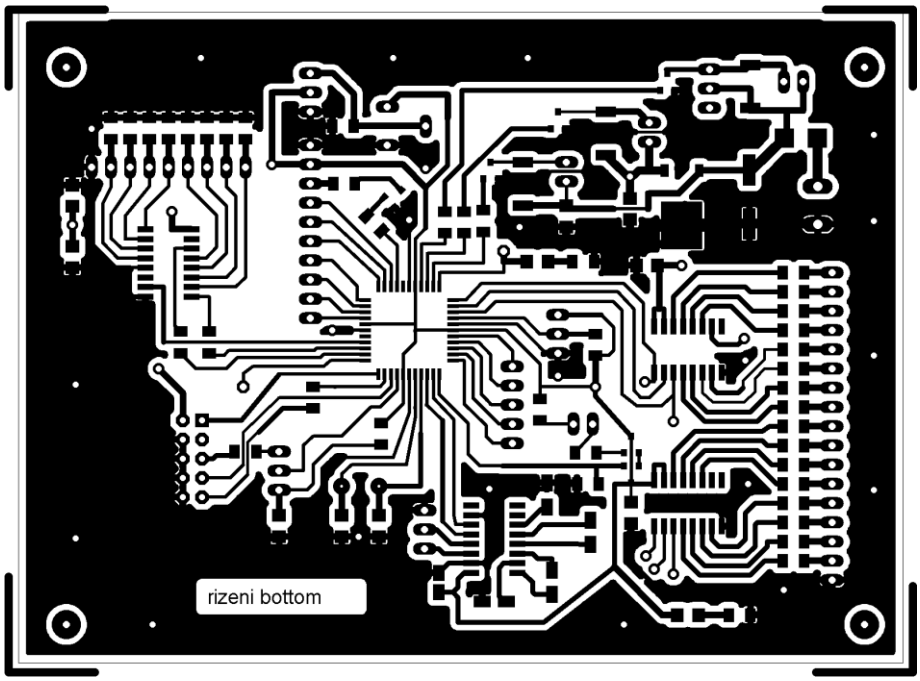


A.2 DPS řídící jednotky strana TOP



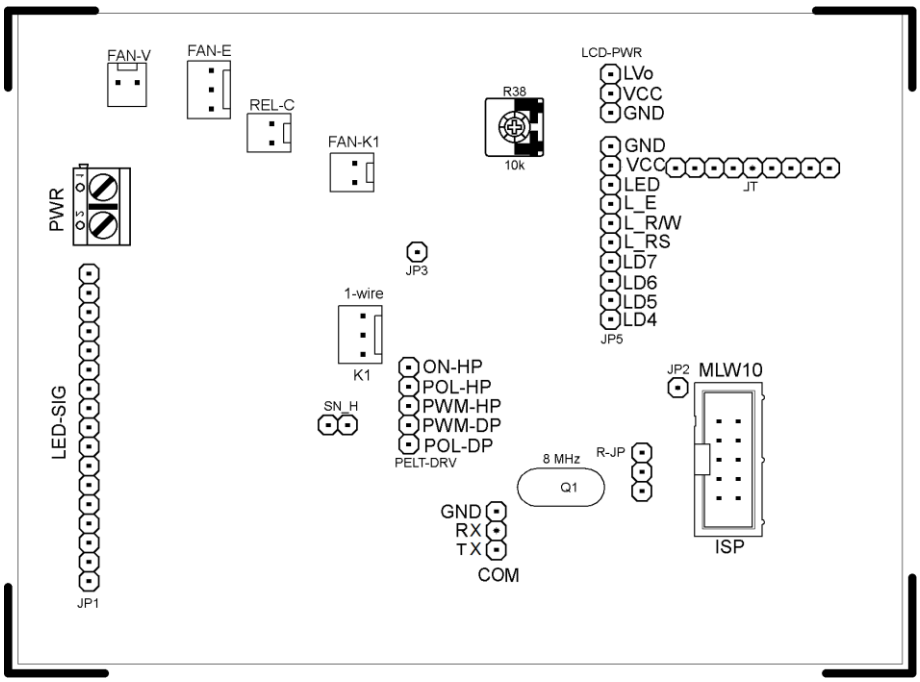
Rozměr desky 120 x 88 [mm], měřítko M1:1

A.3 DPS řídící jednotky strana BOTTOM

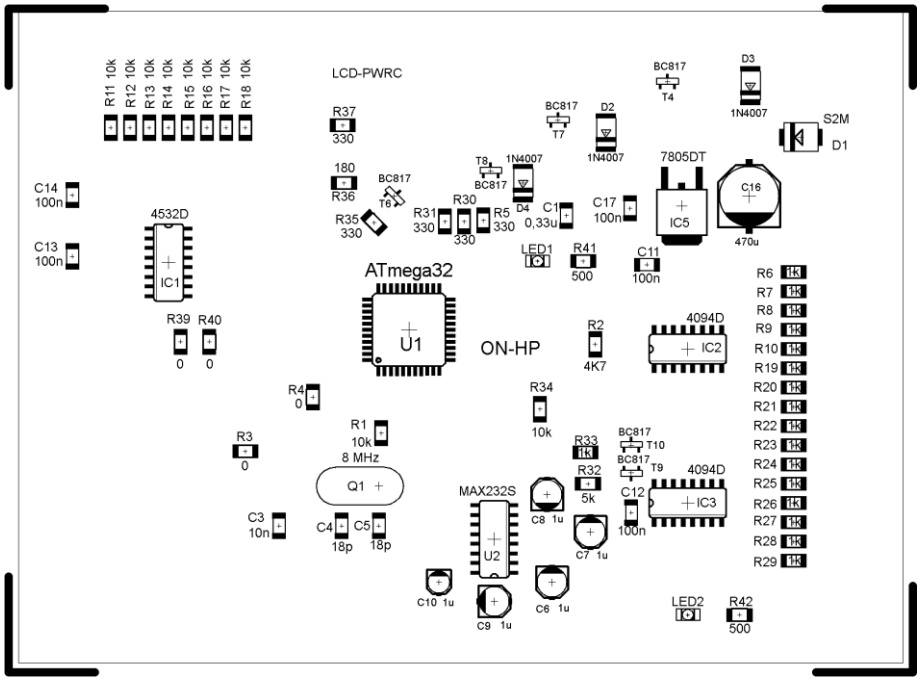


Rozměr desky 120 x 88 [mm], měřítko M1:1

A.4 Plán osazení řídící jednotky strana TOP



A.5 Plán osazení řídící jednotky strana BOTTOM



A.6 Seznam součástek řídící jednotky

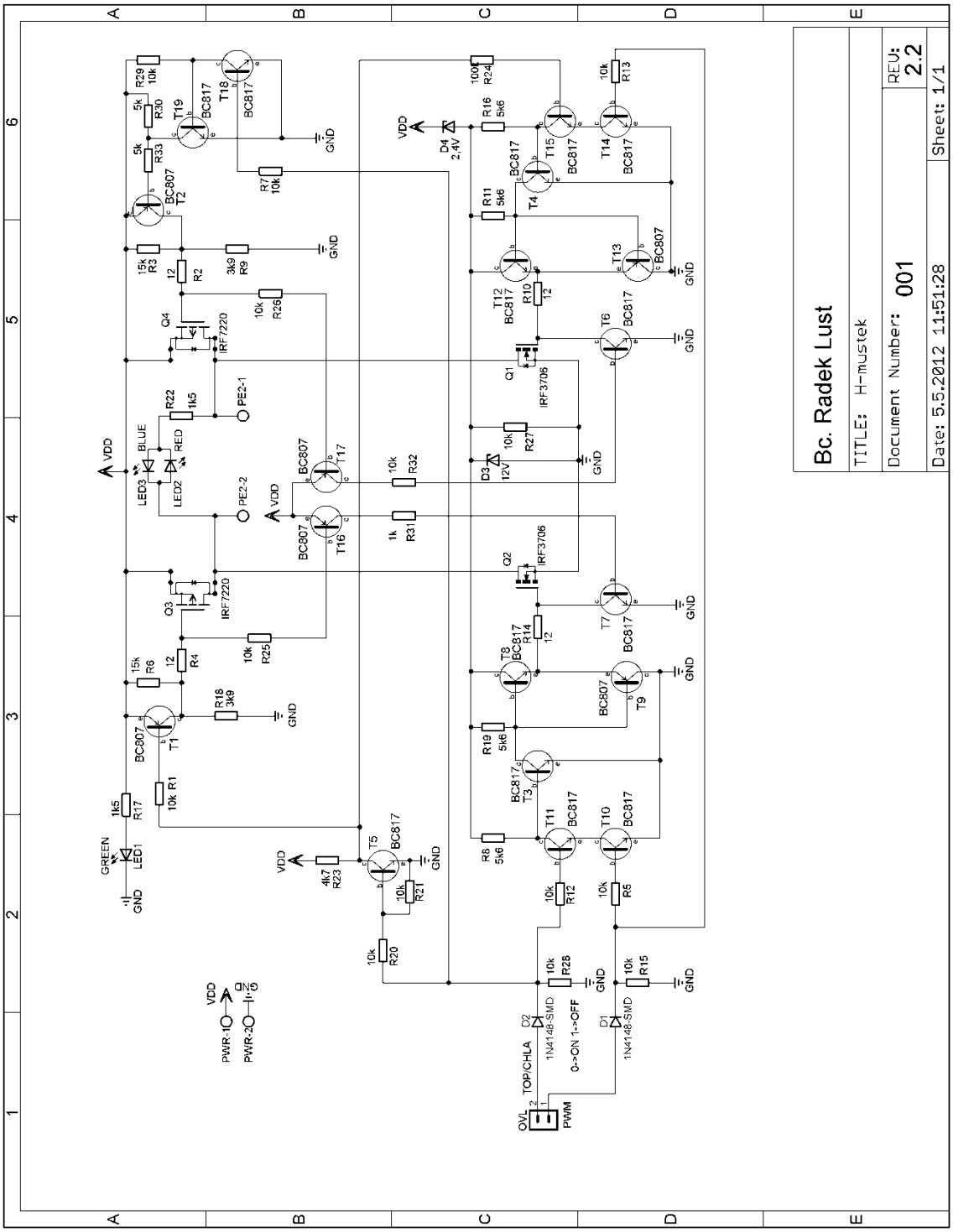
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	0,33u	C1206	Keramický kondenzátor
C3	10n	C1206	Keramický kondenzátor
C4	18p	C1206	Keramický kondenzátor
C5	18p	C1206	Keramický kondenzátor
C6	1u/16V	CAP_B	Elektrolytický kondenzátor
C7	1u/16V	CAP_B	Elektrolytický kondenzátor
C8	1u/16V	CAP_B	Elektrolytický kondenzátor
C9	1u/16V	CAP_B	Elektrolytický kondenzátor
C10	1u/16V	CAP_B	Elektrolytický kondenzátor
C11	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C12	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C13	100n	C1206	Keramický kondenzátor
C14	100n	C1206	Keramický kondenzátor
c16	470u/16V	CAP_F	Elektrolytický kondenzátor
COM	100n	C1206	Keramický kondenzátor
D1	1N4007	MELF (DO213AB)	Dioda
D2	1N4007	MELF (DO213AB)	Dioda
D3	1N4007	MELF (DO213AB)	Dioda
D4	1N4007	MELF (DO213AB)	Dioda
FAN-E		PSH02-03P	Konektor
FAN-K1		PSH02-02P	Konektor
FAN-V		PSH02-02P	Konektor
IC1	4532D	so16	8-bitový prioritní encodér
IC2	4094D	so16	8-bitový posuvný registr
IC3	4094D	so16	8-bitový posuvný registr
IC5	7805	to252	Lineární stabilizátor
ISP		MLW10	Konektor
JP1		PINHD-1x17	Konektor
JP2		PINHD-1x01	Konektor
JP3		PINHD-1x01	Konektor
JP5		PINHD-1x10	Konektor
K1		PSH02-03P	Konektor
LCD-PWRC		PINHD-1x3	Konektor
LED1		1206	LED
LED2		1206	LED
PELTT-DRV		PINHD 1x05	Konektor
PWR		AK500/2	Šroubovací svorkovnice

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
Q1	8 MHz	HC46/U-S	Konektor
R-JP		PINHD-1x03	Konektor
R1	10k	R1206	SMD rezistor
R2	4k7	R1206	SMD rezistor
R3	0	R1206	SMD rezistor
R4	0	R1206	SMD rezistor
R5	330	R1206	SMD rezistor
R6	1k	R1206	SMD rezistor
R7	1k	R1206	SMD rezistor
R8	1k	R1206	SMD rezistor
R9	1k	R1206	SMD rezistor
R10	1k	R1206	SMD rezistor
R11	10k	R1206	SMD rezistor
R12	10k	R1206	SMD rezistor
R13	10k	R1206	SMD rezistor
R14	10k	R1206	SMD rezistor
R15	10k	R1206	SMD rezistor
R16	10k	R1206	SMD rezistor
R17	10k	R1206	SMD rezistor
R18	10k	R1206	SMD rezistor
R19	1k	R1206	SMD rezistor
R20	1k	R1206	SMD rezistor
R21	1k	R1206	SMD rezistor
R22	1k	R1206	SMD rezistor
R23	1k	R1206	SMD rezistor
R24	1k	R1206	SMD rezistor
R25	1k	R1206	SMD rezistor
R26	1k	R1206	SMD rezistor
R27	1k	R1206	SMD rezistor
R28	1k	R1206	SMD rezistor
R29	1k	R1206	SMD rezistor
R30	330	R1206	SMD rezistor
R31	330	R1206	SMD rezistor
R32	5k	R1206	SMD rezistor
R33	1k	R1206	SMD rezistor
R34	10k	R1206	SMD rezistor
R35	330	R1206	SMD rezistor
R36	180	R1206	SMD rezistor
R37	330	R1206	SMD rezistor
R38	10k	CA6V	Trimr
R39	0	R1206	SMD rezistor
R40	0	R1206	SMD rezistor
R41	500	R1206	SMD rezistor
R42	500	R1206	SMD rezistor

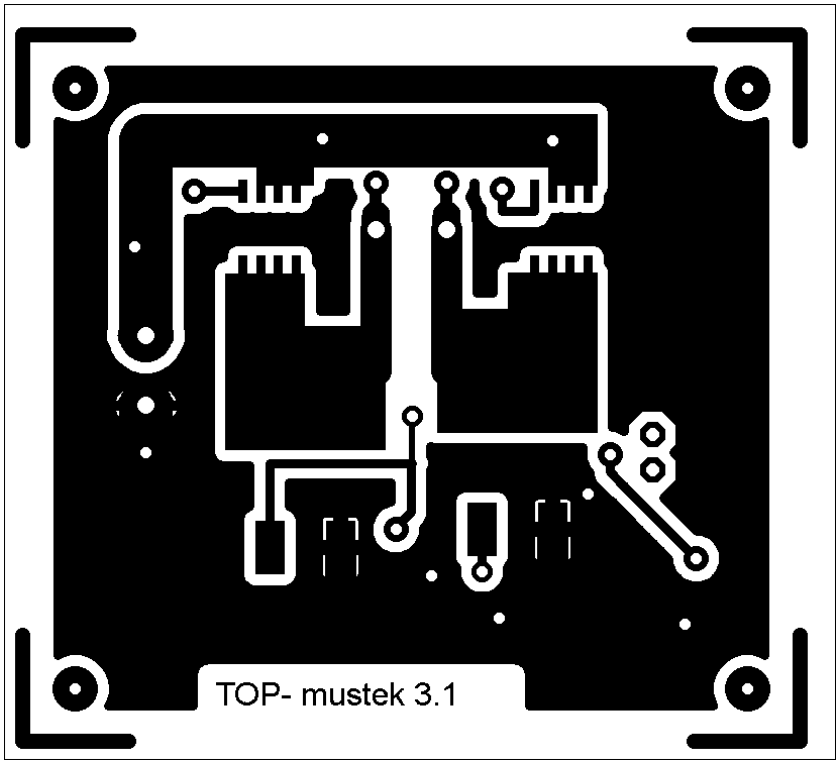
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
REL-C		PSH02-02P	Konektor
SN-H		PINHD-1x02	Konektor
T4	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T6	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T7	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T8	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T9	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T10	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
TL		PINHD-1x02	Konektor
U1	ATMEGA 32	TGFP-44	Mikrokontroler
U2	MAX232	so16	Převodník RS-232

B H-MŮSTEK

B.1 Schéma zapojení H-můstku

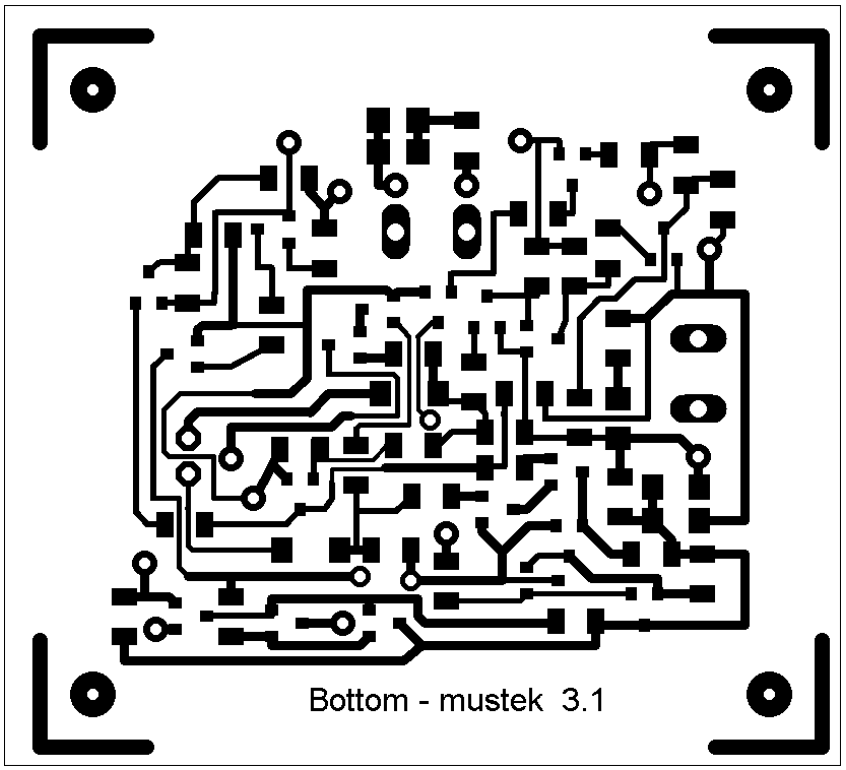


B.2 DPS H-můstku strana TOP



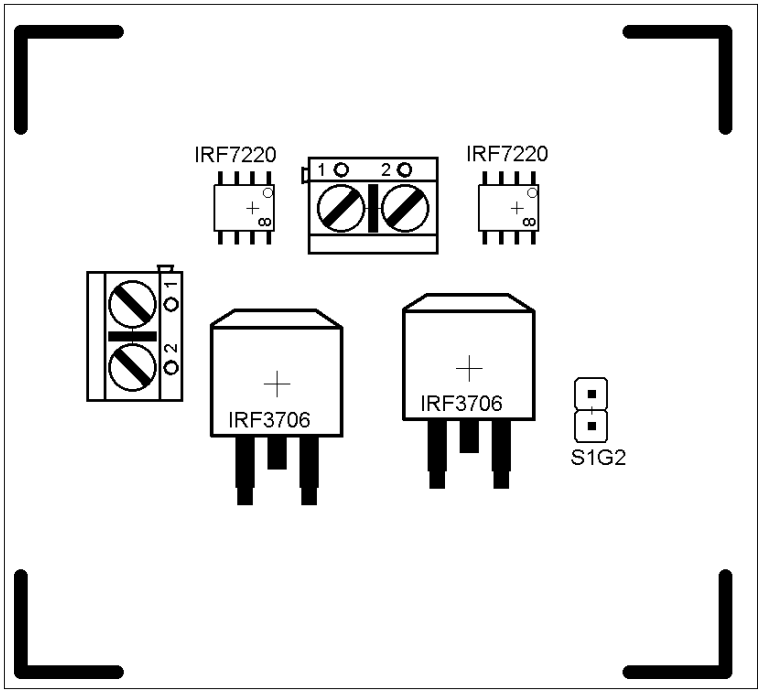
Rozměr desky 55 × 50 [mm], měřítko M2:1

B.3 DPS H-můstku strana BOTTOM

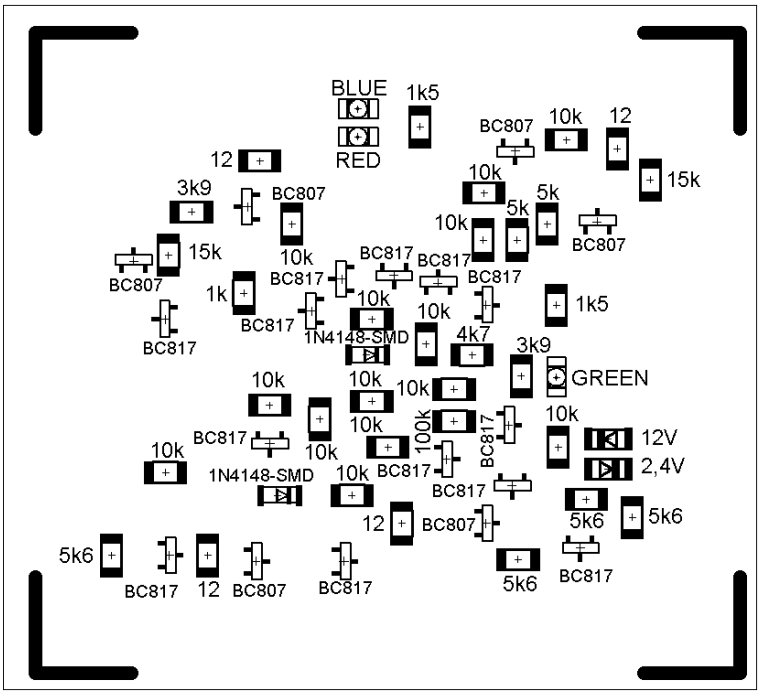


Rozměr desky 55 × 50 [mm], měřítko M2:1

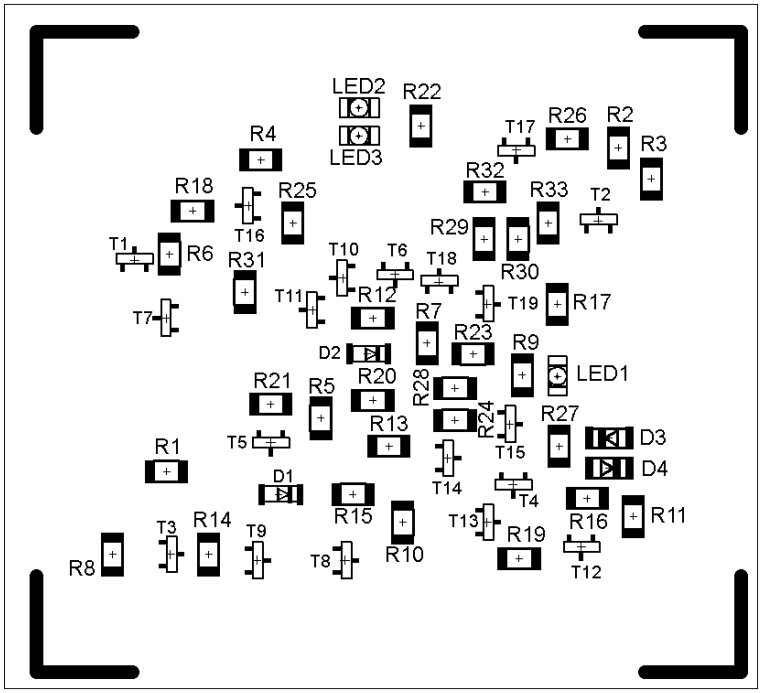
B.4 Osazovací plán H-můstku strana TOP



B.5 Osazovací plán H-můstku strana BOTTOM (hodnoty)



B.6 Osazovací plán H-můstku strana BOTTOM (názvy)



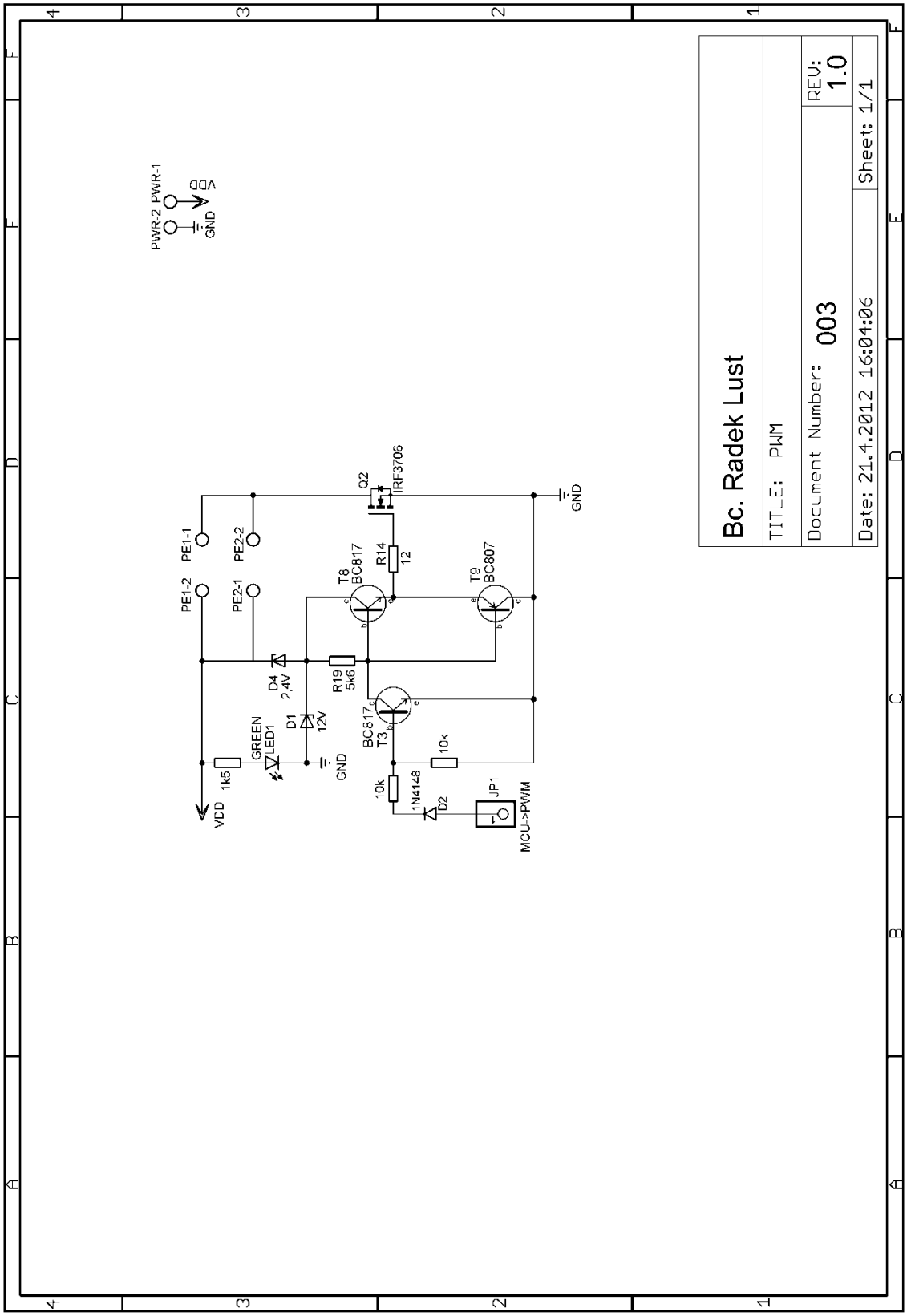
B.7 Seznam součástek pro H-můstek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
D1	1N4148	SOD-80	dioda
D2	1N4148	SOD-80	dioda
D3	12V	SOD-80	Zenerova dioda
D4	2,4V	SOD-80	Zenerova dioda
LED1	Green	1206	Zelená LED
LED2	Red	1206	Červená LED
LED3	Blue	1206	Modrá LED
OVL		PINHD-1X02	Konektor
PE2		AK500/2	Šroubovací svorkovnice
PWR		AK500/2	Šroubovací svorkovnice
Q1	IRF3306	D2PACK	N-MOS tranzistor
Q2	IRF3306	D2PACK	N-MOS tranzistor
Q3	IRF7220	SO-8	P-MOS tranzistor
Q4	IRF7220	SO-8	P-MOS tranzistor
R1	10k	R1206	SMD rezistor
R2	12	R1206	SMD rezistor
R3	15k	R1206	SMD rezistor
R4	12	R1206	SMD rezistor
R5	10k	R1206	SMD rezistor
R6	15k	R1206	SMD rezistor
R7	10k	R1206	SMD rezistor
R8	5k6	R1206	SMD rezistor

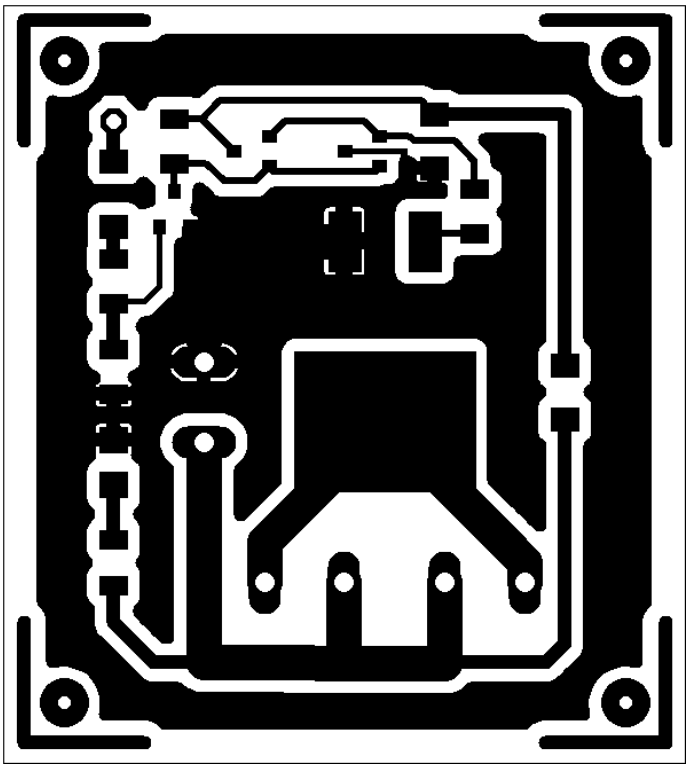
Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R9	3k9	R1206	SMD rezistor
R10	12	R1206	SMD rezistor
R11	5k6	R1206	SMD rezistor
R12	10k	R1206	SMD rezistor
R13	10k	R1206	SMD rezistor
R14	12	R1206	SMD rezistor
R15	10k	R1206	SMD rezistor
R16	5k6	R1206	SMD rezistor
R17	1k5	R1206	SMD rezistor
R18	3k9	R1206	SMD rezistor
R19	5k6	R1206	SMD rezistor
R20	10k	R1206	SMD rezistor
R21	10k	R1206	SMD rezistor
R22	1k5	R1206	SMD rezistor
R23	4k7	R1206	SMD rezistor
R24	100k	R1206	SMD rezistor
R25	10k	R1206	SMD rezistor
R26	10k	R1206	SMD rezistor
R27	10k	R1206	SMD rezistor
R28	10k	R1206	SMD rezistor
R29	10k	R1206	SMD rezistor
R30	5k	R1206	SMD rezistor
R31	1k	R1206	SMD rezistor
R32	10k	R1206	SMD rezistor
R33	5k	R1206	SMD rezistor
T1	BC807	SOT-23	PNP tranzistor
T2	BC807	SOT-24	PNP tranzistor
T3	BC817	SOT-25	NPN tranzistor
T4	BC817	SOT-26	NPN tranzistor
T5	BC817	SOT-27	NPN tranzistor
T6	BC817	SOT-28	NPN tranzistor
T7	BC817	SOT-29	NPN tranzistor
T8	BC817	SOT-30	NPN tranzistor
T9	BC807	SOT-31	PNP tranzistor
T10	BC817	SOT-32	NPN tranzistor
T11	BC817	SOT-33	NPN tranzistor
T12	BC817	SOT-34	NPN tranzistor
T13	BC807	SOT-35	PNP tranzistor
T14	BC817	SOT-36	NPN tranzistor
T15	BC817	SOT-37	NPN tranzistor
T16	BC807	SOT-38	PNP tranzistor
T17	BC807	SOT-39	PNP tranzistor
T18	BC817	SOT-40	NPN tranzistor
T19	BC817	SOT-41	NPN tranzistor

C VÝKONOVÝ SPÍNAČ PWM

C.1 Schéma zapojení výkonového spínače

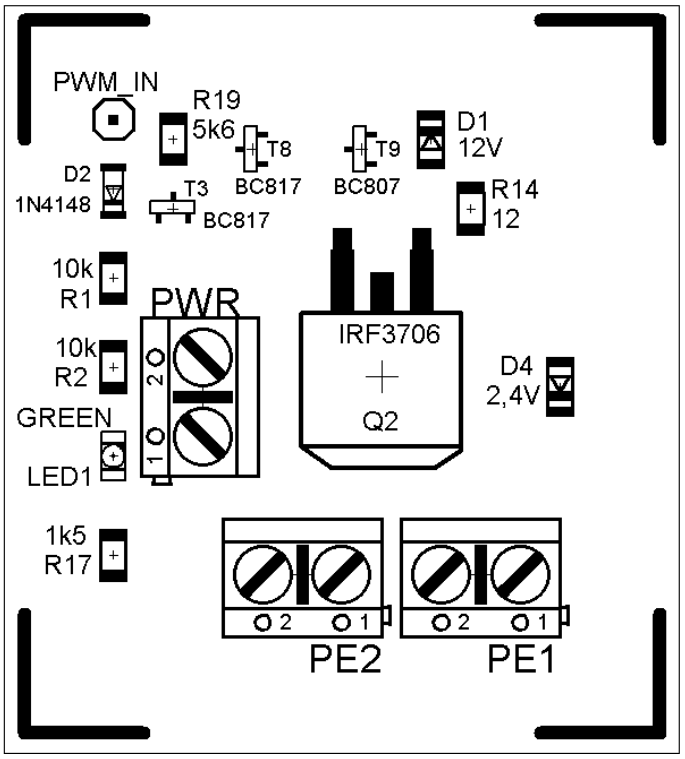


C.2 DPS výkonového spínače

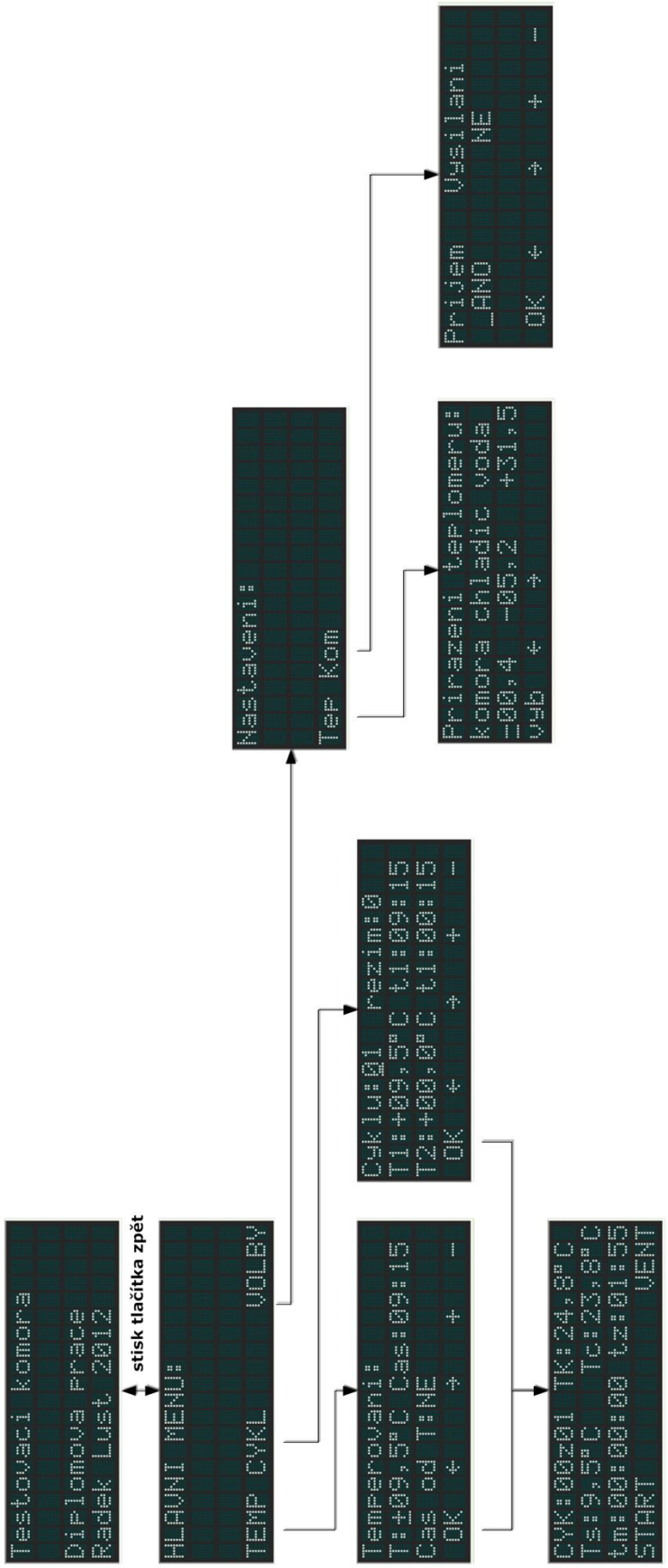


Rozměr desky 40 × 45 [mm], měřítko M2:1

C.3 Osazovací plán výkonového spínače



C.4 Seznam součástek výkonového spínače

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
D1	12V	SOD-80	Zenerova dioda
D2	1N4148	SOD-80	Dioda
D4	2,4V	SOD-80	Zenerova dioda
LED1	Green	1206	Zelená LED
PE1		AK500/2	Šroubovací svorkovnice
PE2		AK500/2	Šroubovací svorkovnice
PWM_IN		PINHD-1x01	Konektor
PWR		AK500/2	Šroubovací svorkovnice
Q2	IRF3306	D2PACK	N-MOS tranzistor
R1	10k	R1206	SMD rezistor
R2	10k	R1206	SMD rezistor
R14	12	R1206	SMD rezistor
R17	1k5	R1206	SMD rezistor
R19	5k6	R1206	SMD rezistor
T3	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T8	BC817	SOT-23	NPN tranzistor
T9	BC807	SOT-23	PNP tranzistor

D MAPA OBRAZOVEK