

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky
Obor: Teoretický základ strojního inženýrství



Návrh zařízení využívající metodu chlazení dlaní

Design of a device using the palm cooling method

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Peter Klepáč
Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Novák, Ph.D.
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klepáč** Jméno: **Peter** Osobní číslo: **501533**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh zařízení využívajícího metody chlazení dlaní

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a device using the palm cooling method

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte rešerši na téma využití metody chlazení dlaní v rámci cvičení.
- 2) Na základě rešerše navrhnete a sestavte zařízení, které by bylo schopné poskytnout metodu chlazení dlaní během tréninku. Soustředte se na technické provedení takového zařízení, a to převážně na měření a regulaci teploty. Zvažte i ergonomii pro jednoduché použití a obsluhu.
- 3) V rámci praktického ověření otestujte teplotní regulaci postaveného zařízení. Vyhodnoťte výsledky a na jejich základě navrhnete možná vylepšení a budoucí směr vývoje.

Seznam doporučené literatury:

- [1] ROSEN, David I. MAGILL, John C. LEGNER, Hartmut H.: Cooling Glove Study. In: Defense Technical Information Center [online]. Physical Sciences Inc Andover MA, 2007. [13.1.2024]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA482978>
- [2] GRAHN, Dennis A., et al. Work volume and strength training responses to resistive exercise improve with periodic heat extraction from the palm. The Journal of Strength & Conditioning Research, 2012, 26.9: 2558-2569

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Novák, Ph.D. U12110.1

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zdeněk Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Tomáš Vyhliďal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu vypracoval samostatne, a že som použil iba podklady uvedené v priloženom zozname.

V Prahe dňa

.....
Peter Klepáč

Podakovanie

Ďakujem Ing. Zdeňkovi Novákovi, Ph.D. za vedenie mojej bakalárskej práce a za ochotu pomôcť mi rozvinúť vlastnú tému. Podakovanie za pomoc pri technologických záležitostiach práce patrí Ing. Michalovi Slanému a za prostredie a usmernenie pri 3D tlači Ing. Pavlovi Trnkovi. Vďaka patrí aj ďalším ľuďom, ktorí neboli vymenovaní a dali mi veľa užitočných rád, ktoré mohli priniesť túto prácu k lepším výsledkom. V neposlednom rade chcem vrelo poďakovať svojim rodičom, ktorých podpora pri štúdiu je nenahraditeľná.

Peter Klepáč

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom zariadenia sprostredkujúceho metódu chladenia dlaní za použitia Peltierových modulov. V úvode je poskytnuté krátke vysvetlenie metódy a jej výsledkov, za ktorým nasleduje prehľad existujúcich produktov na trhu, ktoré metódu dokážu sprostredkovať. Práca stručne vysvetľuje termoelektrické chladenie a jeho využitie v kontexte chladenia dlaní. Výber všetkých kľúčových komponentov zariadenia je bližšie odôvodnený v návrhu. Rozloženiu komponentov je taktiež venovaná pozornosť v snahe zlepšiť ergonómiu. V práci je popísaný konštrukčný proces vedúci k zostaveniu prototypu. Ďalej sú uvedené výsledky regulácie a testovania poukazujúce na funkčnosť zariadenia. Na záver je uvedená cenová rozvaha, ktorá poukazuje na konkurencieschopnosť zvoleného koncepčného riešenia.

Kľúčové slová

chladenie dlaní, termoelektrické chladenie, Peltierov modul, návrh zariadenia

Abstract

This bachelor's thesis deals with the design of a device mediating the method of palm cooling using Peltier modules. At the beginning, a short explanation of the method and its results is provided, followed by an overview of existing products on the market that can mediate the method. The work briefly explains thermoelectric cooling and its use in the context of palm cooling. The selection of all key components of the device is further justified in the design in order to provide a solid foundation. Attention is also paid to the layout of components in an effort to improve ergonomics. The work describes the construction process leading to the assembly of the prototype. Next, the results of regulation and testing indicating the functionality of the device are presented. At the end, a price balance is given, which points to the competitiveness of the chosen conceptual solution.

Keywords

palm cooling, thermoelectric cooling, Peltier module, device design

Obsah

Zoznam skratiek a symbolov	xi
Zoznam obrázkov	xii
Zoznam tabuliek	xiv
1 Úvod	1
2 Chladienie dlaní	3
2.1 Teoretický základ biologických procesov	3
2.2 Výsledky experimentov	4
2.3 Súčasné produkty	4
2.3.1 °Coolmitt	4
2.3.2 CoreTX GO	5
2.3.3 Narwhals	5
2.3.4 Anti-Fatigue Charge Bar	5
2.3.5 CülCan	6
2.3.6 Vyhodnotenie	6
3 Termoelektrické chladienie	7
3.1 Termoelektrické javy	7
3.1.1 Seebeckov jav	7
3.1.2 Peltierov jav	8
3.1.3 Thomsonov jav	8
3.2 Peltierov modul	8
3.2.1 Hlavné parametre a značenie	10
3.3 Využitie v kontexte chladienia dlaní	10
4 Návrh zariadenia	13
4.1 Riešenie termálneho problému	13
4.1.1 Ochladzované rozhranie	13
4.1.2 Peltierové moduly	14
4.1.3 Chladič	15
4.1.4 Ventilátor	18
4.2 Elektronika	19
4.2.1 Zapojenie Peltierových modulov	19
4.2.2 Zdroj	20
4.2.3 Spínací prvok	21
4.2.4 Mikrokontrolér	21
4.2.5 Displej	22
4.2.6 Teplotné senzory	23
4.2.7 Ovládacie prvky	24
4.2.8 Vodiče a spojovacie komponenty	24

4.3	Vnútorné usporiadanie	25
4.4	Umiestnenie ovládacích prvkov	26
4.5	Riadiaci program	27
4.5.1	Meranie teploty platničky	27
4.5.2	PID regulátor	27
4.5.3	Použité knižnice	29
5	Konštrukcia zariadenia	31
6	Regulácia teploty a testovanie	37
7	Cenová rozvaha	41
	Záver	43
	Bibliografia	45
	Prílohy	49
A	Detail umiestnenia senzorov	49
B	Režimy LCD panelu	50
C	Elektronické prílohy	51
C.1	Riadiaci program	51
C.2	Tabulky nameraných hodnôt	51

Zoznam skratiek a symbolov

Skratka	Význam
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
ATP	Adenosintrifosfát (Adenosine triphosphate)
AVA	cievno-žilné anastomózy (arterio-venous anastomoses)
COP	Vykurovací faktor (Coefficient of Performance)
USB	Univerzálna sériová zbernica (Universal Serial Bus)
IDE	Vývojové prostredie (Integrated Development Environment)
I/O	vstup/výstup (input/output)
PWM	Impulzová šírková modulácia (Pulse Width Modulation)
ADC	Analógovo-digitálny prevodník (Analog-to-digital converter)
LCD	displej z tekutých kryštálov (Liquid Crystal Display)
NTC	negatívny teplotný koeficient (Negative Temperature Coefficient)
IEC	International Electrotechnical Commission
GND	uzemnenie (Ground)
PID	proporčný-integračný-derivačný (Proportional-integral-derivative)
I2C	Inter-Integrated Circuit
PVC	polyvinylchlorid
DPH	daň z pridanej hodnoty

Symbol	Jednotka	Veličina
α	$V \cdot K^{-1}$	Seebeckov koeficient
Π	V	Peltierov koeficient
I	A	elektrický prúd
U	V	elektrické napätie
ΔU	V	napätový rozdiel
R	Ω	odpor
T	$^{\circ}C$	teplota
ΔT	$^{\circ}C$	teplotný rozdiel
Q	J	teplo
P	W	výkon
\dot{Q}	W	tepelný tok
R_{th}	m^2KW^{-1}	tepelný odpor

Zoznam obrázkov

2.1	Znázornenie tepno-žilných anastomóz v dlani [3]	3
2.2	Zariadenie °Coolmitt [5]	4
2.3	Zariadenie CoreTX GO [6]	5
2.4	Narwhals [8]	5
2.5	Anti-Fatigue Charge Bar [9]	6
2.6	CülCan [10]	6
3.1	Znázornenie Seebeckovho javu [13]	7
3.2	Znázornenie Peltierovho javu [13]	8
3.3	Znázornenie Thomsonovho javu [13]	8
3.4	Detail Peltierovho článku [16]	9
3.5	Detail Peltierovho modulu [18]	9
4.1	Bočný pohľad na vhodnejšiu plochu s krivosťou R	13
4.2	Náčrt použitý pre vyrezávanie laserom	15
4.3	Znázornenie plánovaného umiestnenia modulov pod platničkou	15
4.4	TEC-127060 [25]	16
4.5	Profil hliníkového chladiča 100x51 [26]	16
4.6	Grafy výrobcu TEC-127060 pre teplotu teplej strany 50 °C [25]	17
4.7	Ventilátor Arctic P12 MAX [30]	18
4.8	Model nástavca	19
4.9	Blokový diagram zapojenia elektroniky (vytvorené pomocou draw.io)	20
4.10	Zdroj LYONZG S-500-12 [31]	20
4.11	H-mostík BTS7960B [32]	21
4.12	Arduino UNO Rev3 [33]	22
4.13	LCD displej [34]	22
4.14	NTC termistor TT4-G10KC8-T180-C312-200 [37]	23
4.15	Zapojenie NTC termistora [38]	23
4.16	Digitálny senzor DS18B20+ [39]	24
4.17	Zapojenie senzora Dallas [40]	24
4.18	Ovládacie komponenty zariadenia	25
4.19	Schéma zariadenia (bočný pohľad)	25
4.20	Umiestnenie ovládania na zadnej stene	26
4.21	Umiestnenie ovládania na prednej stene	26
4.22	Vývojový diagram riadiaceho programu (vytvorené pomocou draw.io)	28
5.1	Chladič po úpravách	31
5.2	Mikroskopický pohľad na rozhranie modulov a chladiča [46]	31
5.3	Inštalácia Peltierových modulov	32
5.4	Nástavec prepájajúci chladič a ventilátor	32
5.5	Nosné stĺpiky	32

5.6	Bočné steny	33
5.7	Poschodia zariadenia	33
5.8	Priebeh montáže	34
5.9	Predná stena	34
5.10	Zadná stena	34
5.11	Spodná a vrchná stena	35
5.12	Finálne vyhotovenie	35
6.1	Regulácia teploty s komponentami mimo skrine	37
6.2	Snímka platničky z termokamery	38
6.3	Snímka H-mostíka z termokamery	38
6.4	Regulácia teploty s komponentami v skrini	38
6.5	Regulácia teploty s komponentami v skrini po úprave programu	39
6.6	Odporúčané umiestnenie dlane pri používaní	39
6.7	Regulácia teploty s dlaňou položenou od začiatku cyklu	39
6.8	Regulácia teploty s dlaňou položenou 10 sekúnd po ustálení	40
6.9	Regulácia teploty na hodnotu 15°C	40
1	Umiestnenie NTC termistora	49
2	Umiestnenie senzora DS18B20+	49
3	Východiskový režim	50
4	Režim nastavovania času	50
5	Chladiaci režim	50

Zoznam tabuliek

4.1	Vybrané rozmery rúk mužskej časti populácie USA vo veku 40 rokov .	13
4.2	Vybrané rozmery rúk ženskej časti populácie USA vo veku 40 rokov .	14
4.3	Hlavné parametre TEC1-127060 [25]	14
4.4	Dosadené hodnoty do výpočtového nástroja v prvej iterácii	16
4.5	Veličiny charakterizujúce ustálený stav	17
4.6	Hlavné parametre Arctic P12 MAX [30]	18
4.7	Rýchlosť vzduchu v medzerách chladiča [m/s]	19
4.8	Hlavné parametre LYONZG S-500-12 [31]	21
4.9	Hlavné parametre H-mostíku BTS7960B [32]	21
4.10	Hlavné parametre Arduina Uno Rev3 [33]	22
4.11	Hlavné parametre LCD displeja [34]	22
4.12	Hlavné parametre NTC termistora TT4-G10KC8-T180-C312-200 [37]	23
7.1	Náklady na materiál	41
7.2	Náklady na elektrické súčiastky	42

Kapitola 1

Úvod

Chladienie dlaní je inovatívna metóda, ktorá umožňuje efektívne znižovať vnútornú telesnú teplotu človeka a zvyšovať tak športový výkon. Jedna z prvých vedeckých publikácií, ktorá sa touto problematikou zaoberala, bola publikovaná v roku 2009 [1]. Vzhľadom na vysokú mieru kompetitívnosti vo vrcholových športoch nemusí byť prekvapivé, že aj po uplynutí viac ako 14 rokov nemá široká verejnosť povedomie o možných benefitoch chladienia dlaní.

Cielom tejto práce je vytvorenie proof-of-concept zariadenia, ktoré by umožnilo popularizovať tento zaujímavý fenomén. Na rozdiel od súčasných pionierov v obore, budú pre sprostredkovanie chladienia použité Peltierove moduly. Tento koncept bol zatiaľ skúmaný len výskumníkmi sponzorovanými americkou agentúrou pre výskum a vývoj nových vojenských technológií - DARPA bez vytvorenia použiteľného prototypu. V práci bude priblížená metóda chladienia dlaní a uvedené súčasne dostupné produkty. Ďalej bude venovaná pozornosť teórii termoelektrického chladienia a Peltierovým článkom. V rámci praktickej časti budú priblížené postupné kroky návrhu, konštrukcie, regulácie a testovania zariadenia. Na záver bude uvedená ekonomická rozvaha, ktorá určí výsledné náklady pre tvorbu prototypu.

Kapitola 2

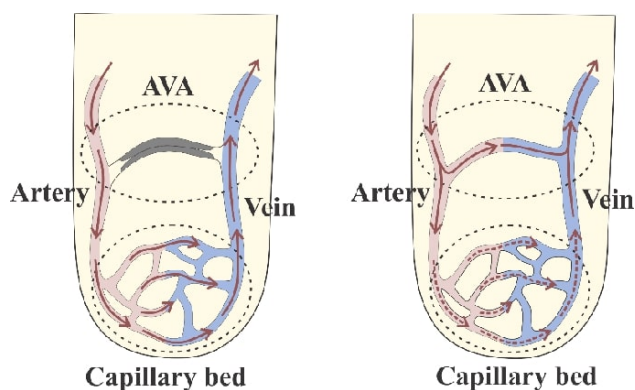
Chladienie dlani

2.1 Teoretický základ biologických procesov

Aj keď sú biologické procesy chladienia dlani z odbornej stránky značne komplikované, je možné ich zjednodušene popísať nasledovne.

Pre vykonávanie pohybu naše svaly ako zdroj energie využívajú adenosintrifosfát (ATP). Mitochondrie ho produkujú, avšak len v určitom teplotnom rozsahu. Akonáhle sa teplota vo svaloch zvýši nad určitú úroveň, špeciálne enzýmy zastavia produkciu ATP v mitochondriách. Toto je jeden z hlavných dôvodov nástupu únavy a následného zníženia objemu práce pri cvičení. [2]

Ako ľudia sa zaraďujeme medzi cicavce, pre ktoré je známe, že ich pokožka je pokrytá chlpmi (srstou), v snahe tepelne sa izolovať. Za špecifických podmienok je ale nevyhnutné teplo z tela odvádzať alebo naopak privádzať. Pre sprostredkovanie tohto mechanizmu sa v nechľapatých častiach (dlaniach, chodidlách, oblastiach tváre) nachádza špeciálny typ ciev - tepno-žilné anastomózy, znázornené na obrázku 2.1.



Obrázok 2.1: Znázornenie tepno-žilných anastomóz v dlani [3]

Tie umožňujú prúdiacej krvi obísť kapilárie, ktoré bežne spomaľujú prúdenie a vytvorí tak celok, ktorý funguje ako ideálne miesto pre prenos tepla. V prípade snahy o ochladienie môže krv putovať do srdca a následne svalov, ktoré pracujú a znižovať tak lokálne vysoké teploty. Pre sprostredkovanie odvedenia tepla sa nechľapaté časti (z praktických dôvodov zvyčajne dlane) pokladajú na chladné rozhranie. Teplota tohto rozhrania by nemala byť nižšia než 10 až 12 °C, aby nedošlo k vazokonstrikcii (zúženiu ciev) a zníženiu efektivity odvodu tepla. [2]

2.2 Výsledky experimentov

V štúdiu z americkej univerzity Stanford participanti vykonávali cviky ako zdvihy alebo bench-press dva krát týždenne počas viacerých po sebe idúcich týždňoch. Chladienie dlaní bolo aplikované počas prestávok medzi sériami cvičení po dobu 3 minút. Po 3 týždňoch cvičenia bench-pressu sa skupine s chladenými dlaniami zvýšil objem vykonanej práce o 40% (oproti 13% u skupiny bez chladienia dlaní). Po 6 týždňoch cvičenia zdvihov sa skupine s predošlými skúsenosťami zvýšil objem vykonanej práce o 144% (oproti 5% po 2 týždňoch u skupiny bez chladienia dlaní) a skupine bez predošlých skúseností o 80% (oproti 20% u skupiny bez chladienia dlaní). Tieto a mnohé iné výsledky overili predošlé pozorovania efektu chladienia dlaní na objem vykonanej práce, demonštrovali spojitost medzi vnútornou telesnou teplotou a nástupom únavy počas silového cvičenia a poukázali na potenciálne nové spôsoby zvyšovania sily a objemu vykonanej práce. [4]

2.3 Súčasné produkty

Na trhu sa vyskytli mnohé produkty, ktoré by umožňovali istú mieru chladienia dlaní. V práci budú ďalej analyzované len tie, ktoré sú relevantné vzhľadom na metódu chladienia dlaní popísanú v podkapitole 2.1 a v čase písania komerčne dostupné. Stručne vysvetlím spôsoby použitia týchto produktov, ich hlavné komponenty, parametre, cenu a zhodnotím ich efektívnosť.

2.3.1 °Coolmitt

°Coolmitt od spoločnosti Arteria Technology [5] na obrázku 2.2 sa skladá z dvoch častí, chladiacej rukavice a hlavnej jednotky. Hlavná jednotka je rozoberateľná, spodná časť je izolovaná nádoba a vrchná časť riadiaca jednotka. Rukavica je navrhnutá tak, aby pritekajúca voda v rukavici odvádzala teplo rovnomerne zo všetkých oblastí zvolenej dlane a článkov prstov. Pri každom použití je potrebné izolovanú nádobu naplniť vodou a ľadom, rovnako ako aj doplniť vodu do okruhu s rukavicou. Zariadenie je pred použitím nutné nabiť, výrobca uvádza výdrž batérie 6 hodín. Momentálna predajná cena zariadenia je 995 amerických dolárov.



Obrázok 2.2: Zariadenie °Coolmitt [5]

2.3.2 CoreTX GO

CoreTX GO od spoločnosti CET [6] na obrázku 2.3 sa skladá z hlavnej jednotky a tepelného výmenníka valcovitého tvaru, ktoré zvyčajne zostávajú spojené. Výmenník je obojstranný, plocha jeho priemeru je na základe dostupných obrázkov do 10 cm. Je možné pripojiť ďalší výmenník a zariadenie využívať v páre. Pri prvom použití je potrebné naplniť chladiaci okruh demineralizovanou vodou. Zariadenie je neprenosné, je nutné napájanie z elektrickej siete. Rozmery sú 30cm x 15cm x 35cm a váha 7 kg. Výrobca cenu uvádza len na požiadanie, zdroje tvrdia, že sa jedná o 2993 amerických dolárov [7].



Obrázok 2.3: Zariadenie CoreTX GO [6]

2.3.3 Narwhals

Narwhals od spoločnosti Apex Cool Labs [8] na obrázku 2.4 pozostávajú z izolovanej nádoby a viečka so zväzkom tepelne vodivých trubiek. Pre správne použitie je do nádoby potrebné vložiť zamrznuté Cool-not-Cold™ balíčky a vodu s teplotou 16 až 18°C. Trúbky si dokážu uchovať teplotu 10 až 16°C po dobu aspoň 2 hodín. Výška jednej jednotky Narwhals je 27,9 cm, priemer 10,2 cm a váha 1,45 kg. Predajná cena produktu (jeden pár) je 495 amerických dolárov.



Obrázok 2.4: Narwhals [8]

2.3.4 Anti-Fatigue Charge Bar

Anti-Fatigue Charge Bar od spoločnosti AVA Cooling Technology [9] na obrázku 2.5 pozostáva z izolovanej nádoby, ktorej steny sprostredkujú chladenie.

Pred použitím je možné vložiť celú nádobu do chladiaceho zariadenia, alebo len vymeniť vodu v jej vnútri. Produkt je schopný udržiavať teplotu v rozmedzí 7,2 až 15,5 °C, avšak výrobca neuvádza ako dlho. Používateľ môže naraz chladiť obidve dlane. K určeniu teploty vo vnútri môže pomôcť teplomer nachádzajúci sa v jednom z viečok. Cena produktu je uvedená ako 64,95 amerických dolárov.



Obrázok 2.5: Anti-Fatigue Charge Bar [9]

2.3.5 CülCan

CülCan od spoločnosti Black Ice [10] na obrázku 2.6 je koncepčne podobný Anti-fatigue Charge bar, avšak rozmerovo menší. Umožňuje chladiť len jednu dlaň. Príprava na použitie spočíva v ponorení plechovky do ľadovej vody na 70 minút. Výrobca uvádza, že produkt udržiava teplotu 13,9 °C po dobu až 60 minút. Dĺžka CülCan-u je približne 12,7 cm, priemer 5,1 cm a váha 270 gramov. Na stránke je uvedená cena 39,95 amerických dolárov.



Obrázok 2.6: CülCan [10]

2.3.6 Vyhodnotenie

Produkty opísané v podkapitole 2.3 majú mnohé limitácie. Väčšina z nich predpokladá, že užívateľ pri každom použití využije iné zariadenie schopné zmrazovania alebo chladienia. Mnohé vyžadujú pre svoje fungovanie zložitejšie dopĺňanie kvapalín. Ceny profesionálnejších zariadení ako °Coolmitt a CoreTX GO sú pomerne vysoké. Produkty ako Narwhals, AF Charge Bar a Cülcan časom znižujú svoju efektivitu účinne chladiť dlane. V kapitole 3 budú vysvetlené princípy termoelektrického chladienia a ich využitie pre adresovanie týchto výziev.

Kapitola 3

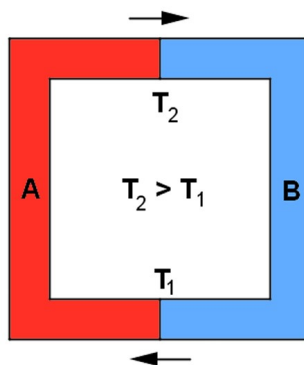
Termoelektrické chladenie

3.1 Termoelektrické javy

Experimentálne skúsenosti naznačujú, že kontaktné napätie a teplota elektrického obvodu sú vzájomne závislé, táto skutočnosť tvorí základ termoelektrických javov, ktoré bližšie popíšem. [11]

3.1.1 Seebeckov jav

Začiatkom 19. storočia nemecký fyzik Thomas Johann Seebeck pozoroval, že pokiaľ sú styčné body dvoch rozličných spojených kovových materiálov umiestnené v miestach s rôznymi teplotami (viď obrázok 3.1) vzniká rozdiel napätia, ktorý je proporcionálny k vzniknutému teplotnému gradientu. [12]



Obrázok 3.1: Znázornenie Seebeckovho javu [13]

Túto závislosť určuje Seebeckov (termoelektrický) koeficient, pre ktorý v prípade nižších teplotných rozdielov platí

$$\alpha = \frac{\Delta U}{\Delta T}, \quad (3.1)$$

kde ΔU je vzniknutý napäťový rozdiel a ΔT rozdiel teplôt. Hodnoty Seebeckovho koeficientu sú nižšie pre kovy, rádovo jednotky $\mu V K^{-1}$ a vyššie pre polokovy, rádovo stovky $\mu V K^{-1}$. [14]

3.1.2 Peltierov jav

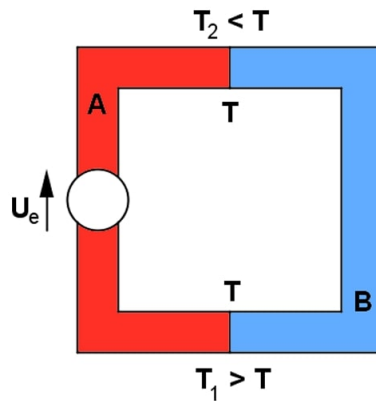
Francúzsky fyzik Jean-Charles Athanase Peltier neskôr popísal inverzný jav k Seebeckovmu javu. Tvrdil, že pokiaľ elektrický prúd prechádza cez spojenia dvoch rozličných materiálov, vzniká medzi nimi teplotný rozdiel (viď obrázok 3.2). [15] V závislosti od smeru prúdu sa v týchto spojeniach uvoľňuje alebo absorbuje teplo určené ako

$$Q_P = \Pi I, \quad (3.2)$$

kde Π je Peltierov koeficient a I elektrický prúd. Peltierov koeficient je možné určiť ako

$$\Pi = \alpha T, \quad (3.3)$$

pričom platí, že T je teplota v Kelvinoch a α spomínaný Seebeckov koeficient, ktorý poukazuje na spojitosť medzi Peltierovým a Seebeckovým javom. [12]



Obrázok 3.2: Znázornenie Peltierovho javu [13]

3.1.3 Thomsonov jav

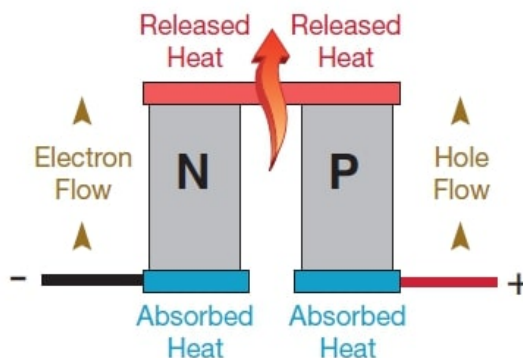
Thomsonov Jav bol objavený v roku v roku 1851 Williamom Thomsonom a uzatvára termoelektrické javy. Popisuje, že pokiaľ majú konce jedného vodiča rôznu teplotu, vzniká na nich veľmi malé termoelektrické napätie (viď. obrázok 3.3). Vysvetlenie spočíva v zrýchlenom pohybe elektrónov na konci s vyššou teplotou, vďaka čomu majú elektróny tendenciu prechádzať ku koncu s nižšou teplotou a hromadiť sa. [13]



Obrázok 3.3: Znázornenie Thomsonovho javu [13]

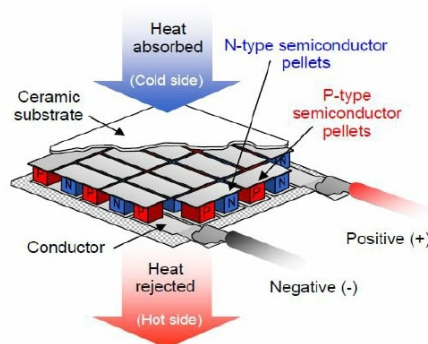
3.2 Peltierov modul

Na základe javov popísaných v kapitole 3.1 je možné zostaviť Peltierov článok (viď obrázok 3.4). Skladá sa z polovodičových stĺpikov typu N a typu P, ktoré sú bežne vyrábané zo zliatiny telluridu bismutitého (Bi_2Te_3).



Obrázok 3.4: Detail Peltierovho článku [16]

Elektricky sériovým a termálne paralelným zapojením mnohých Peltierových článkov vytvoríme Peltierov modul (viď obrázok 3.5). Spojenie článkov sa realizuje pomocou mostíkov, ktoré sa väčšinou vyrábajú z medi. Celé zapojenie je uložené medzi dvomi keramickými platňami, ktoré dávajú celej štruktúre oporu a elektricky ju izolujú od okolitého prostredia. [17]



Obrázok 3.5: Detail Peltierovho modulu [18]

Peltierov modul funguje ako tepelné čerpadlo, umožňuje odčerpávanie, ale aj pričerpávanie tepla pri napojení na zdroj jednosmerného elektrického prúdu. V prípade chladenia môže byť celkové odvádzané teplo Q_C zo studenej strany modelované ako

$$Q_C = Q_P - Q_{Rth} - Q_{Rv}, \quad (3.4)$$

kde Q_P je teplo odvedené z dôsledku Peltierovho javu, Q_{Rth} spätne prenesené teplo a Q_{Rv} teplo z Joulových strát. Tepla Q_{Rth} sa dá popísať ako

$$Q_{Rth} = \frac{\Delta T}{R_{th}}, \quad (3.5)$$

kde ΔT je rozdiel teplôt teplej a studenej strany modulu a R_{th} je tepelný odpor modulu. Teplo Q_{Rv} je charakterizované ako

$$Q_{Rv} = \frac{I^2 R_v}{2}, \quad (3.6)$$

kde I je elektrický prúd a R_v elektrický odpor modulu. [19]

3.2.1 Hlavné parametre a značenie

Medzi základné parametre, ktoré výrobcovia uvádzajú u Peltierových modulov patria:

- Q_{MAX} - maximálne prenášané teplo pri teplotnom rozdieli o veľkosti 0°K medzi stranami modulu,
- dT_{MAX} - maximálny teplotný rozdiel medzi stranami modulu, keď nie je prenášané teplo,
- I_{MAX} - elektrický prúd dosiahnutý pri Q_{MAX} ,
- U_{MAX} - elektrické napätie dosiahnuté pri Q_{MAX} .

Hodnoty Q_{MAX} a dT_{MAX} sú teoretické. Pomáhajú lepšie charakterizovať výkonnosť Peltierových modulov a bežne ich nie je možné dosiahnuť. Vo väčšine aplikácií musí medzi nimi dôjsť ku kompromisu. Závislosti medzi týmito veličinami sú uvádzané v grafoch výrobcov Peltierových modulov. [19]

Značenie Peltierových modulov má štandardne nasledujúci tvar: TEC1-12706. Prvé dve písmená sú vždy prítomné a vyjadrujú, že sa jedná o termoelektrické zariadenie. Tretí charakter môže byť C v prípade štandardného zariadenia alebo S v prípade zariadenia menšieho. Na štvrtom mieste je číslo, ktoré vyjadruje počet poschodí s článkami. Prvé tri čísla za čiarkou vyjadrujú počet článkov daného modulu. Ďalšie čísla udávajú hodnotu I_{MAX} . V špecifických prípadoch sa za číselnou časťou môžu vyskytnúť tvary ako T125 alebo T200, ktoré by označovali maximálnu teplotu v stupňoch Celzia. [20] Značenie zohráva špecifickú úlohu. Pri pripojení červeného vodiča (druhý vodič je čierny) na pozitívnu svorku zdroja, bude strana modulu s potlačeným značením pri spustení studená [21].

Peltierove moduly majú väčšinou štvorcovú podstavu s veľkosťou 15, 20, 25, 30, 40, 50, a 62 mm.

3.3 Využitie v kontexte chladenia dlaní

V rámci mojej rešerše sa mi nepodarilo nájsť komerčne dostupné zariadenie, ktoré by využívalo termoelektrické chladenie. Koncept bol zatiaľ bližšie skúmaný len pracovníkmi z Physical Sciences Inc. sponzorovanými Americkou agentúrou pre výskum a vývoj nových vojenských technológií (DARPA). Vo svojej práci [22] sa venovali možnému využitiu takto navrhnutého zariadenia v obrnených vozidlách pri nasadení vojakov v púštnych oblastiach. Pracovníkom sa podarilo overiť výsledky dosiahnuté vedcami zo Standfordu. Dokázali, že efekt podtlaku je za bežných podmienok zanedbateľný. Celkový prenos tepla by bol teda väčší v prípade využitia dvojice ochladzovaných rozhraní bez podtlaku, než pri využití jedného rozhrania s podtlakom. Vo svojej správe predstavili len jednoduchý prototyp.

Na základe zistených nárokov na sprostredkovanie metódy chladenia dlaní by bolo potrebné vytvoriť zariadenie, ktoré by disponovalo ochladzovaným rozhraním s nasledovnými vlastnosťami:

- regulovateľnosť teploty na 12°C [2],
- odvod tepelného toku približne o veľkosti 33W (z jednej dlane) [22],

- tvar, ktorý zaručí čo najlepšiu kontaktnú plochu s dlaňou.

Peltierove moduly by bolo vhodné použiť pre splnenie týchto nárokov, pretože ponúkajú výhody ako:

- absencia pohyblivých častí,
- relatívne malé rozmery a hmotnosť,
- umožnenie presnej teplotnej regulácie,
- vysoká miera spoľahlivosti,
- tichý chod bez vibrácií,
- šetrnosť voči životnému prostrediu,
- ľahká možnosť napájania priamo zo zdroja jednosmerného prúdu aj s prostredníctvom PWM. [23]

Kapitola 4

Návrh zariadenia

4.1 Riešenie termálneho problému

Termálne problémy (súvisiace s prenosom tepla), ale aj rôzne iné, je dnes možné simulovať pomocou špecializovaných programov a dosiahnuť tak výsledky, ktoré sú veľmi blízke realite. V rámci tejto podkapitoly použijem spôsob, ktorý s predstavím jednoduchší spôsob, ktorý sa dá použiť pre orientačné nadimenzovanie, bez použitia zložitejšieho modelovania.

4.1.1 Ochladzované rozhranie

Ochladzované rozhranie je základným prvkom nielen z užívateľského pohľadu. Jeho hlavným cieľom je tepelná výmena medzi dlaňami a Peltierovými článkami. V rámci mojej práce som sa z ekonomických a časových dôvodov rozhodol pracovať na zariadení s jedným rozhraním.

Na začiatku som sa zameral na dlaň samotnú, konkrétne na jej tvar a rozmery. Výskumníci z Physical Sciences Inc. demonštrovali, že ideálny tvar predstavuje plocha s určitou mierou krivosti R (viď obrázok 4.1), ktorá zaisťuje optimálny prítlak dlane na podložku [22]. Keďže používatelia nemajú možnosť plne obopnúť tento tvar, ako tomu je napríklad u objektu valcovitého tvaru, nedochádza k narušeniu prúdenia krvi.



Obrázok 4.1: Bočný pohľad na vhodnejšiu plochu s krivosťou R

Vzhľadom na to, že výroba plochy s krivosťou by bola finančne náročnejšia, rozhodol som sa pre platničku s rovnou plochou. Jej rozmery som určil pomocou údajov o rozmeroch ľudských rúk dostupných na stránkach americkej vládnej agentúry NASA [24]. Bližšie informácie zhrňujú tabuľky 4.1 a 4.2.

Rozmer	5 percentil	50 percentil	95 percentil
Dĺžka dlane [cm]	17,9	19,3	20,6
Šírka dlane [cm]	8,2	8,9	9,6

Tabuľka 4.1: Vybrané rozmery rúk mužskej časti populácie USA vo veku 40 rokov

Rozmer	5 percentil	50 percentil	95 percentil
Dĺžka dlane [cm]	15,8	17,2	18,7
Šírka dlane [cm]	6,9	7,8	8,6

Tabuľka 4.2: Vybrané rozmery rúk ženskej časti populácie USA vo veku 40 rokov

V rámci optimalizácie pre použitie mužmi aj ženami bola zvolená šírka platničky 9 cm a dĺžka 14 cm. Dĺžka je významne kratšia z dôvodu snahy pokryť len tú časť ruky, u ktorej je garantovaná najväčšia styčná plocha (dlaň a k nej bližšie nachádzajúce sa články prstov).

Posledný rozmer, hrúbka bola určená ako 4 mm, pre čo najmenšie množstvo materiálu. Zároveň sa jedná o najmenší rozmer, ktorý ešte umožnil bezproblémové vyvrtanie diery pre umiestnenie dostupného odporového snímača teploty - sondy s priemerom 3 mm. Poloha diery bola zvolená tak, aby sa snímač nachádzal v blízkosti Peltierových článkov a spodnej časti dlane. Myslí sa tým miesto v blízkosti zápastia, ktoré je vzhľadom na tvar ruky vždy celé pritlačené. Týmto spôsobom bude zaručené, že pri regulovaní teploty bude môcť podložka reagovať na priloženie dlane.

Uvažované materiály pre platničku boli kovy s veľkými hodnotami koeficientu tepelnej vodivosti, konkrétne meď, hliník a jeho zliatiny (1050A, 6082). Vzhľadom na zníženie nákladov bol zvolený hliník. Žiaľ, pri výrobe sa nepodarilo získať informáciu o presne použitom type.

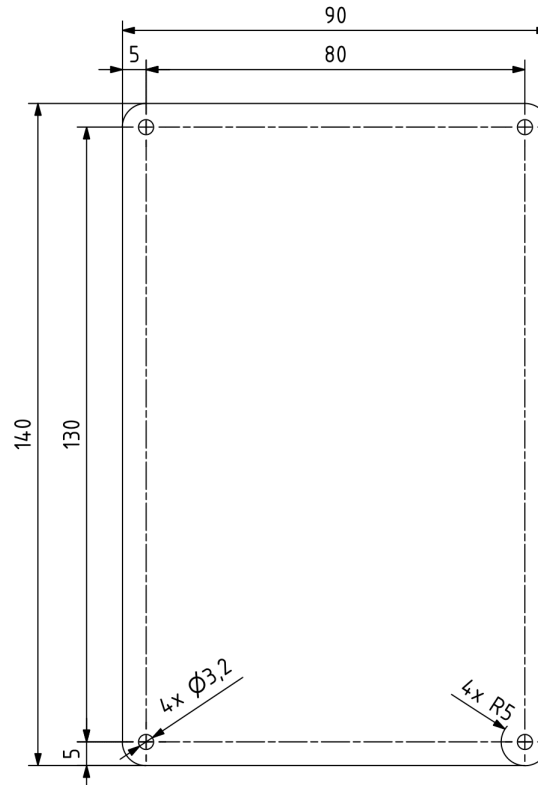
Platnička bola vyrezávaná laserom na zakázku, podľa náčrtu na obrázku 4.2. Diery boli dodatočne upravené pre použitie zápusťných šróbov. Šróby, konkrétne ich počet a umiestnenie, je oblasťou vhodnej bližšej pozornosti, nakoľko Peltierove moduly vyžadujú určitý tlak po nainštalovaní. Vzhľadom na to, že platnička je pomerne tenká, vzniká riziko jej ohybu. Pre robustné riešenie by bolo potrebné navrhnuť komplikovanejšie uloženie. Šróby v tomto prípade budú slúžiť len na to, aby udržali platničku na mieste a ich dimenzovanie nebude ďalej bližšie rozoberané.

4.1.2 Peltierové moduly

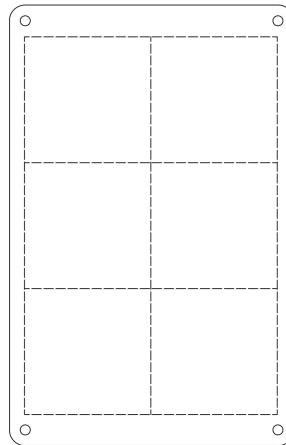
Hlavnou úlohou Peltierových modulov je odvádzanie tepla z platničky do chladíča. Ich rozmery boli volené s ohľadom na veľkosť platničky tak, aby pod platničkou pokrývali plochu 120x80 mm pri použití 6 kusov (viď obrázok 4.3). Moduly by mali odvádzat z dlane tepelný tok o veľkosti približne 33 W. Pri použití 6 modulov bude zo studenej strany jedného Peltieroveho modulu odvádzaný tepelný tok \dot{Q}_C o veľkosti najviac 5,5 W. Zvolil som preto moduly TEC1-127060 (viď obrázok 4.4) dostupné na internetovom obchode GM electronic [25], ktoré poskytnú tejto aplikácii dostatočnú rezervu. Ich parametre pre rôzne teploty teplej strany sú znázornené v tabuľke 4.3.

Teplota teplej strany [$^{\circ}C$]	25	50
Q_{MAX} [W]	51,4	55
ΔT_{MAX} [$^{\circ}C$]	67	75
I_{MAX} [A]	6	6
U_{MAX} [V]	15,4	16,4
R_v [Ω]	2,25	2,54

Tabuľka 4.3: Hlavné parametre TEC1-127060 [25]



Obrázok 4.2: Náčrt použitý pre vyrezávanie laserom



Obrázok 4.3: Znáznornenie plánovaného umiestnenia modulov pod platničkou

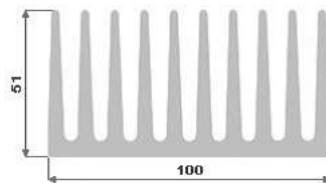
4.1.3 Chladič

Chladič zaisťuje odvod tepla z teplej strany Peltierových modulov. Vybraný bol tak, aby bolo možné využiť nútenú konvekciu s axiálne umiestneným ventilátorom pre zaistenie nižšieho tepelného odporu chladiča R_{Tch} . Konkrétne bol zvolený hliníkový chladič 100x51 (viď obrázok 4.5) s dĺžkou 20 cm z internetového obchodu ehlinik.cz [26]. Hlavným dôvodom bola veľkosť, ktorá by umožnila inštaláciu všetkých článkov a nízka cena.

Snahou pri dimenzovaní bolo nájsť rovnovážny stav, pri ktorom by mohol celý termálny systém fungovať neobmedzene. Nasleduje popis iteračného postupu, ktorý



Obrázok 4.4: TEC-127060 [25]



Obrázok 4.5: Profil hliníkového chladiča 100x51 [26]

umožní tento stav nájsť. Pre prvotný odhad prúdu a napätia v Peltierovom module bolo možné použiť hodnoty I a U , ktoré su nižšie než I_{MAX} a U_{MAX} udávané výrobcom. Pomocou nich bol určený elektrický výkon dodávaný z napájania P_{el} ako

$$P_{el} = I \cdot U = 3 \cdot 5 = 15W. \quad (4.1)$$

Tepelný tok, ktorý je potrebný odviešť na teplej strane jedného Peltierového modulu bude

$$\dot{Q}_H = P_{el} + \dot{Q}_C = 15 + 5,5 = 20,5W. \quad (4.2)$$

Zo všetkých šiestich modulov bude preto nevyhnutné odvádzať tepelný tok $\dot{Q}_{H6} = 123$ W. Na stránke ďalšieho výrobcu chladičov [27] boli všetky známe alebo odhadnuté hodnoty dosadené do výpočtového nástroja podľa tabuľky 4.4. Nástroj uviedol,

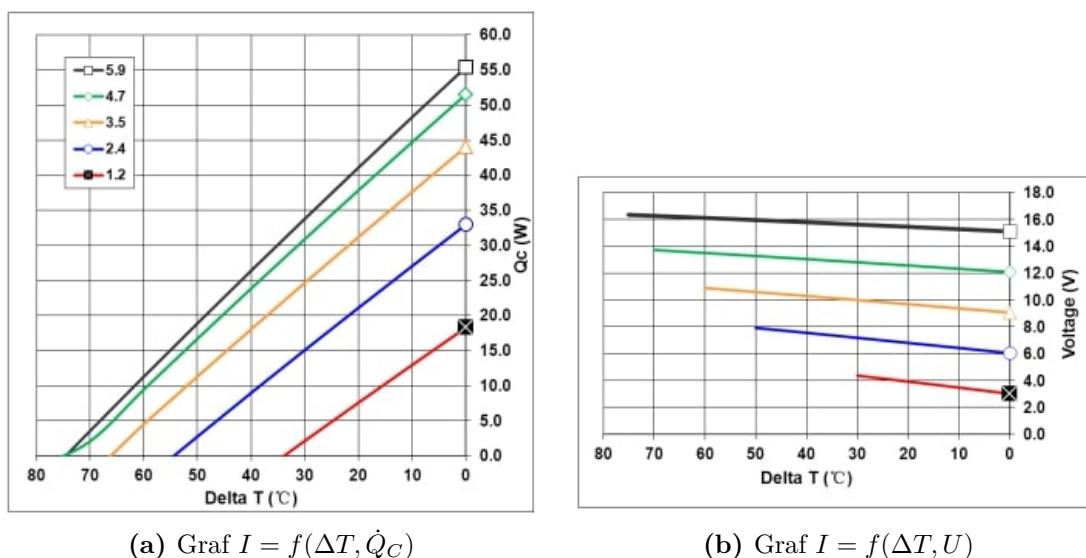
Materiál	extrudovaný hliník
Šírka [mm]	100
Dĺžka [mm]	200
Výška [mm]	51
Hrúbka podstavy [mm]	6
Hrúbka rebier [mm]	4
Počet rebier [mm]	10
Teplota okolia [°C]	25
Disipované teplo [W]	123
Šírka zdroja tepla [mm]	80
Dĺžka zdroja tepla [mm]	120
Horná medzera [mm]	0
Ľavá medzera [mm]	0
Pravá medzera [mm]	0

Tabuľka 4.4: Dosadené hodnoty do výpočtového nástroja v prvej iterácii

že pre dosiahnutie teploty chladiča $50,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, je potrebná rýchlosť prúdiaceho vzduchu medzi rebrami $4,5\text{ m/s}$. Pre výpočet nových hodnôt prúdu a napätia je potrebné použiť grafy výrobcu, ktoré sú vyhotovené pre teploty teplej strany modulov 25 alebo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nakoľko je hodnota teplej strany chladiča $50,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, použijeme grafy na obrázku 4.6, keďže sú k tejto hodnote najbližšie. Rozdiel teplôt medzi stranami jedného modulu je možné spočítať ako

$$\Delta T = T_H - T_C = 50,7 - 12 = 38,7^{\circ}\text{C} \quad (4.3)$$

Rozdiel teplôt ΔT a odvádzaný tepelný tok $\dot{Q}_C = 5,5\text{ W}$, môžeme vyniesť do grafu 4.6 a) odhadnúť novú hodnotu prúdu $I = 2,65\text{ A}$ potrebnú pre napájanie jedného modulu. Hodnoty prúdu I a ΔT môžeme vyniesť do grafu 4.6 b) a približne určiť novú hodnotu napätia $U = 9\text{ V}$. Stanovením nových hodnôt prúdu a napätia končí



Obrázok 4.6: Grafy výrobcu TEC-127060 pre teplotu teplej strany $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25]

daná iterácia a celý postup sa opakuje, pokiaľ sa hodnoty neustália.

K ustáleniu došlo pri štvrtej iterácii a všetky podstatné veličiny znázorňuje tabuľka 4.5.

I [A]	1,85
U [V]	6,15
ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	34,1
T_H [$^{\circ}\text{C}$]	46,1
P_{el} [W]	11,38
\dot{Q}_{H6} [W]	101,3
R_{Tch} [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$]	0,21

Tabuľka 4.5: Veličiny charakterizujúce ustálený stav

Maximálna teplota, pri ktorej môže vybraný Peltierov modul fungovať, je $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ [25] a s návrhom sme túto hranicu neprekročili. Hodnota elektrického prúdu I je v odporúčanom rozsahu $(0 \div 0,66)I_{MAX}$ [28]. Koeficient účinnosti COP jedného modulu je možné spočítať ako

$$COP = \frac{Q_C}{P_{el}} = \frac{5,5}{11,4} = 0,48. \quad (4.4)$$

Jeho hodnota je vo zvyčajnom rozmedzí (0,3 - 0,7) [29]. Predbežné nadimenzovanie chladiča by malo vyhovovať aplikácii a poskytnúť dostatočnú rezervu pri náročnejších operačných stavoch.

4.1.4 Ventilátor

Hlavnou úlohou ventilátora v zariadení je zaisitiť prehánanie okolitého chladiaceho vduchu medzi rebami chladiča rýchlosťou 4,5 m/s. Pomocou výpočtového nástroja spomínaného v predchádzajúcom oddieli 4.1.3 bolo možné určiť pokles tlaku v chladiči. Jeho veľkosť je 42,7 Pa a rovnaký statický tlak musí byť schopný vyvinúť aj ventilátor pri zanedbaní strát na vstupe a výstupe. Šírka chladiča bola zvolená ako 100 mm, a preto aj minimálny rozmer ventilátora musí byť väčší. Na základe týchto požiadavok bol zvolený ventilátor Arctic P12 MAX (viď obrázok 4.7) [30]. Jeho najdôležitejšie parametre bližšie znázorňuje tabuľka 4.6. Ventilátor umožňuje



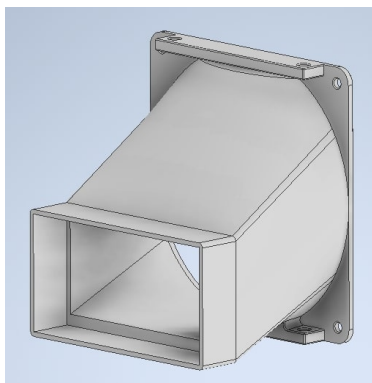
Obrázok 4.7: Ventilátor Arctic P12 MAX [30]

Rozmery [mm]	120x120x25
Hmotnosť [g]	184
Pracovná teplota [$^{\circ}C$]	0 ÷ 40
Otáčky [rpm]	200 ÷ 3000
Maximálny prietok [m^3/h]	137,69
Úroveň hluku [Sone]	0,6
Nominálne napätie [V]	12
Štartovacie napätie [V]	3,9
Prúd [A]	0,29

Tabuľka 4.6: Hlavné parametre Arctic P12 MAX [30]

ovládanie s PWM pomocou 4-pinového konektora, avšak vzhľadom na požiadavky bude musieť byť vždy zapnutý na plný výkon. Otočený bude tak, aby pracoval v režime nasávania. Na základe experimentov, ktoré sa vykonali neskôr nehrozí prekročenie pracovnej teploty vzduchu stanovenej výrobcom.

Úzko spojený s ventilátorom je nástavec, ktorý zaisťuje prepojenie s chladičom a usmerňuje prúdiaci vzduch. Bol vytvorený pomocou technológie 3D tlače a model, ktorý bol na to použitý, je možné vidieť na obrázku 4.8. Vzhľadom na špecifický tvar nástavca nie je zrejmé, aký bude mať dopad na prúdenie vzduchu medzi rebami chladiča. Z tohto dôvodu bolo realizované experimentálne meranie rýchlosti



Obrázok 4.8: Model nástavca

vzduchu pomocou anemometra. Použitý bol univerzálny prístroj pre meranie klimatických veličín Testo 400 v kombinácii so sondou so žhaveným drôtom 0635 1570. Výrobca udáva presnosť sondy ako $\pm(0.5 \text{ m/s} + 5 \% \text{ z meranej rýchlosti})$. Dostupná sonda nebola pre meranie najvhodnejšia, nakoľko žhavený drôtik nemohol byť umiestnený priamo medzi rebrá chladiča z dôvodu plastovej ochrany. Počas merania tak mohlo dochádzať k škrteniu prúdiaceho vzduchu. Aj napriek určitej miere nepresnosti namerané hodnoty znázorňuje tabuľka 4.7. Celková priemerná rýchlosť

Vzdialenosť od podstavy [mm]	Poradie medzery								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	3,9	3,7	2,5	2	2,7	2,1	4,3	5	5,1
29	5,7	5	4,8	4,2	4,9	5,1	5,3	5,2	5,4
45	6,3	5,5	5,3	5,7	5,9	6	5,9	6,3	6,5

Tabuľka 4.7: Rýchlosť vzduchu v medzerách chladiča [m/s]

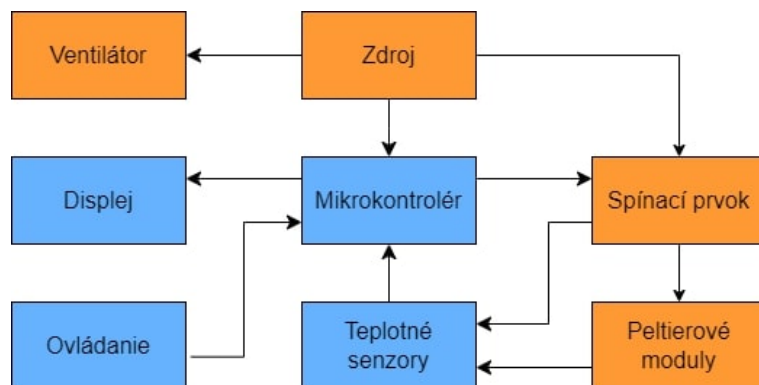
prúdiaceho vzduchu v chladiči je 4,83 m/s, čo je hodnota vyššia než predpokladaných 4,5 m/s. Rozloženie rýchlosti nemá rovnomerný charakter a je viditeľné, že v strede v blízkosti podstavy sú namerané najnižšie hodnoty. Aj napriek tomu, že sa jedná o negatívny jav, ventilátor by mal byť naďalej schopný odvieť dostatočné množstvo tepla. Celkový návrh pre termálnu časť je týmto ukončený.

4.2 Elektronika

V tejto podkapitole bude bližšie vysvetlený výber ďalších elektronických komponentov. Ich predbežné zapojenie znázorňuje diagram na obrázku 4.9. Oranžovou farbou sú vyfarbené bloky znázorňujúce výkonovú elektroniku a farbou modrou bloky znázorňujúce riadiacu elektroniku.

4.2.1 Zapojenie Peltierových modulov

Výber modulov TEC-12706 bol bližšie odôvodnený v oddieli 4.1.2. V prípade ich vyššieho počtu sa štandardne využíva zapojenie sériové, paralelné alebo ich kombinácia. Aby bolo možné rozhodnúť, ktoré zvoliť, budem uvažovať hodnotu prúdu $I_{MAX} = 6 \text{ A}$ a hodnotu napätia $U_{MAX} = 16,4 \text{ V}$ ako pracovnú. Pri sériovom zapojení je potrebný prúd 6 A a napätie 98 V. Naopak, pri použití zapojenia paralelného



Obrázok 4.9: Blokový diagram zapojenia elektroniky (vytvorené pomocou draw.io)

je potrebné napätie 16,4 V a prúd 36 A. Nakoľko je oveľa jednoduchšie a lacnejšie zadovážiť napäťový než prúdový zdroj, bolo zvolené práve paralelné zapojenie. Kombinované zapojenie nie je ďalej rozoberané vzhľadom na to, že teplotné rozdiely by mohli viesť k stavom, kde by individuálne moduly mohli byť nadmerne alebo nedostatočne napájané.

4.2.2 Zdroj

Vzhľadom na to, že sú známe hodnoty Peltierových modulov v rovnovážnom stave $I = 1,85 \text{ A}$ a $U = 6,15 \text{ V}$, je možné dimenzovať napäťový zdroj. Pre použitie regulácie bude potrebné vyššie napätie, preto je zvolená štandardná hodnota napätia zdroja 12 V. Paralelné zapojené moduly budú pri dosadení maximálnej hodnoty prúdu I_{MAX} predstavovať záťaž o veľkosti

$$P = 6 \cdot U \cdot I_{MAX} = 6 \cdot 12 \cdot 6 = 432 \text{ W}. \quad (4.5)$$

Záťaž ventilátora je 3,48 W a u zvyšnej riadiacej elektroniky je zanedbateľná. Od zariadenia je zároveň očakávaná možnosť využitia elektrickej energie zo siete. Zvolený bol preto spínaný zdroj S-500-12 na obrázku 4.10 od spoločnosti LYONZG [31], ktorého maximálny výstupný výkon 500 W poskytuje dostatočnú rezervu. Jeho hlavné parametre bližšie znázorňuje tabuľka 4.8. Disponuje ochranou proti preťaženiu, skratu, prehriatiu a nadprúdu. Na zdroji sa nachádzajú svorky pre pripojenie na jednofázovú sieť a šesť svoriek (tri kladné a tri záporné) pre pripojenie elektroniky. Priamo pripojené na zdroj budú Peltierove moduly, mikrokontrolér a ventilátor.



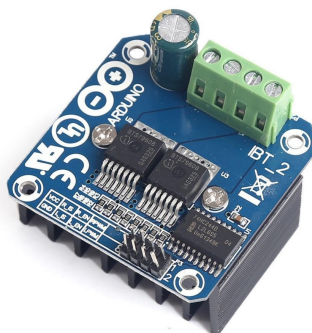
Obrázok 4.10: Zdroj LYONZG S-500-12 [31]

Rozmery [mm]	215 x 115 x 50
Vstupné napätie	AC 85-264V 47-63Hz
Výstupné napätie [V]	12
Max. výstupný prúd [A]	41
Max. výstupný výkon [W]	500
Rozsah prevádzkových teplôt [$^{\circ}C$]	-20 ÷ 60
Rozsah prevádzkovej relatívnej vlhkosti [%]	20 ÷ 90

Tabuľka 4.8: Hlavné parametre LYONZG S-500-12 [31]

4.2.3 Spínací prvok

Pre možnosť regulácie napätia Peltierových modulov je potrebné zvoliť spínací prvok, ktorý umožňuje prechod prúdu až o veľkosti 36 A s napätím 12V. Vybraný bol H-mostík BTS7960B [32] na obrázku 4.11, ktorý spĺňa tieto podmienky (viď tabuľka 4.9). Jeho prepojenie s mikrokontrolérom sa dá realizovať pomocou 4 vodičov (GND, 5V, PWM1, PWM2). Vzhľadom na dostupnosť dvoch kusov H-mostíkov sú v zariadení umiestnené oba, aby sa výkon, ktorý spínajú, rovnomerne rozložil.



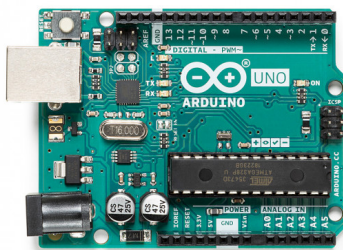
Obrázok 4.11: H-mostík BTS7960B [32]

Rozmery [mm]	40 x 50 x 12
Napájacie napätie [V]	5,5 ÷ 27
Max. prúd [A]	43

Tabuľka 4.9: Hlavné parametre H-mostíku BTS7960B [32]

4.2.4 Mikrokontrolér

Pre svoju všestrannosť a spoľahlivosť bola pre riadenie elektroniky zvolená doska Arduino Uno Rev3 (viď obrázok 4.12) postavená na čipe ATmega328. Vďaka integrovanému USB konektoru umožňuje bez akýchkoľvek špeciálnych nastavení alebo zapojení priame nahrávanie programu. Programovanie kontroléra je možné vo vývojovom prostredí Arduino IDE pomocou jazyka WIRING, ktorý je postavený na C++. Doska zároveň umožňuje napájanie z USB konektora, napájacieho konektora alebo napájacích pinov. Rozsah vstupného napätia je vhodný pre priame pripojenie na zvolený spínaný zdroj. [33] Všetky ďalšie podstatné vlastnosti sú zachytené v tabuľke 4.10.



Obrázok 4.12: Arduino UNO Rev3 [33]

Operačné napätie [V]	5
Vstupné napätie napätie [V]	6 ÷ 12
Zdroj napätia [V]	5 (max 800 mA)
Počet digitálnych I/O kanálov	14
Počet PWM kanálov	6
Počet 10-bitových ADC kanálov	6

Tabuľka 4.10: Hlavné parametre Arduina Uno Rev3 [33]

4.2.5 Displej

Pre zobrazenie dát bol zvolený LCD displej so zbernicou I2C (viď obrázok 4.13) [34]. Zbernica umožňuje pripojenie na arduino len pomocou 4 vodičov. Podsvietenie displeja je zelené s tmavými písmenami. Pomocou zabudovaného potenciometru je možné nastavovať kontrast. Všetky ďalšie údaje znázorňuje tabuľka 4.11.



Obrázok 4.13: LCD displej [34]

Rozlíšenie	2 riadky x 16 znakov
Napájanie [V]	5
Rozmery modulu [mm]	80 x 35 x 11
Veľkosť zobrazovacej plochy [mm]	64.5 x 16

Tabuľka 4.11: Hlavné parametre LCD displeja [34]

4.2.6 Teplotné senzory

Ako bolo spomenuté v oddieli 4.1.1, pre umožnenie regulácie ochladzovanej platničky je potrebná teplotná sonda priemeru 3 mm. Zvolený bol Pt100 snímač TT4-2249 [35] spoločne s prevodníkom MAX31865 [36]. Žiaľ, neskôr nebolo možné sensor spoločne s prevodníkom spojzduť, a preto bol nakoniec použitý NTC termistor TT4-G10KC8-T180-C312-200 (viď obrázok 4.14) [37]. Jeho dôležité parametre znázorňuje tabuľka 4.12.

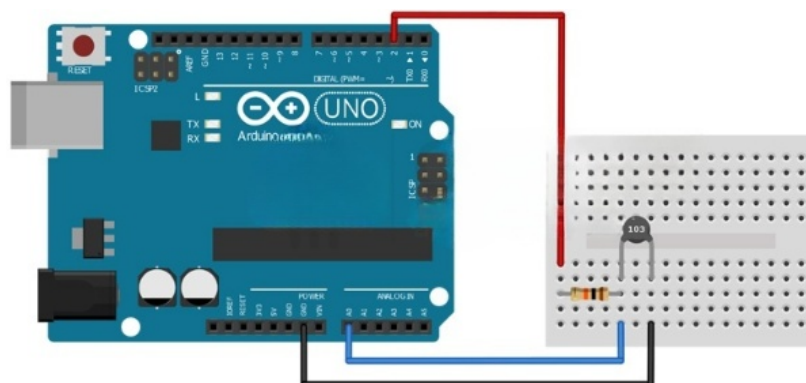


Obrázok 4.14: NTC termistor TT4-G10KC8-T180-C312-200 [37]

Odpor R_0 (bez záťaže) pri 25 °C	10000 Ω
Tolerancia pri $T_0 = 25$ °C	$\pm 1\%$
Konštanta β (25/85)	3435K $\pm 1\%$
Teplotný operačný rozsah	-40 °C \div 180 °C
Vonkajšie rozmery	$\varnothing 3 \times 12$ mm
Dĺžka kábla	0,2 m

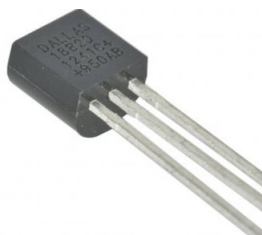
Tabuľka 4.12: Hlavné parametre NTC termistora TT4-G10KC8-T180-C312-200 [37]

Pre zapojenie NTC termistora bol použitý delič napätia s 10 k Ω rezistorom na obrázku 4.15. Neskôr sa ukázalo, pravdepodobne z dôvodu pripojenia väčšieho množstva komponentov, že digitálny výstup, ktorý bol spínaný, neposkytoval potrebné 5V napätie. Sensor bol nakoniec natrvalo pripojený k zdroju 5V, čo môže pri 25 °C spôsobovať jeho ohrievanie o veľkosti 0,625 mW. Tolerancia odporu 10 k Ω rezistora je 1%.

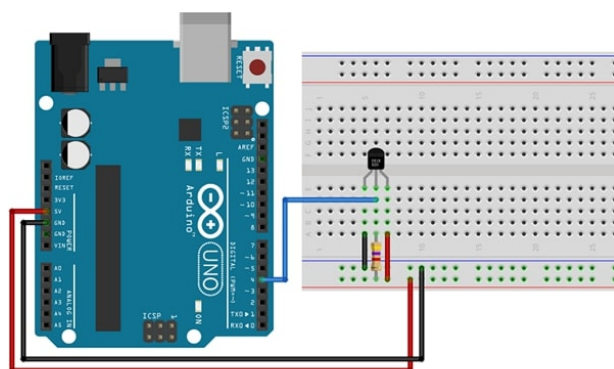


Obrázok 4.15: Zapojenie NTC termistora [38]

Ďalší teplotný senzor, ktorý bol použitý, je digitálne čidlo DS18B20+ (viď obrázok 4.16). Je umiestnené na jednom z tranzistorov H-mostíka a v prípade neobvyklého zvýšenia teploty sa zariadenie zastaví. Zvolené bolo preto, lebo pre svoju funkciu nevyžaduje žiadne externé komponenty a dosahuje presnosť 0,2 °C. Práca so senzorom je jednoduchá, nakoľko sa do kontroléra vracia priamo hodnota teploty. Teplotný rozsah je -55 až 125 °C a rozsah napájania 3 až 5,5 V. [39] Senzor používa jednovodičovú komunikáciu a jeho zapojenie s 4,7 k Ω pull-up rezistorom je na obrázku 4.17.



Obrázok 4.16: Digitálny senzor DS18B20+ [39]



Obrázok 4.17: Zapojenie senzora Dallas [40]

4.2.7 Ovládacie prvky

Ovládanie zariadenia je realizované pomocou tlačidiel a kolískového spínača (viď obrázky 4.18). Tlačidlá sú štyri 1-polohové OFF-(ON) (1 zelené, 1 modré, 2 biele) [41]. Prepojenie každého z nich s mikrokontrolérom je realizované pomocou 10 k Ω pull-down rezistora. Kolískový spínač je 2-pólový OFF-ON v červenej farbe s menovitým prúdom 15 A a menovitým napätím 250 V [42]. Je umiestnený medzi fázovým vodičom a fázovou svorkou zdroja.

4.2.8 Vodiče a spojovacie komponenty

Výber kabeláže sa dá rovnako ako pre elektronické komponenty rozdeliť na dve časti. Výkonové vodiče boli zvolené podľa prúdovej zaťažiteľnosti. Použité vodiče pre riadiacu časť sú DuPont káble typu M/M, M/F a F/F podľa potreby. Pre zlepšenie káblového manažmentu a pripojenie mnohých komponentov na spoločný GND a 5V terminál je použité pájené pole. Zariadenie spoľahlivého prepojenia výkonnostných vodičov bolo zaistené pomocou WAGO svoriek. Konektor IEC C14 bol použitý,



(a) Tlačidlo [41]



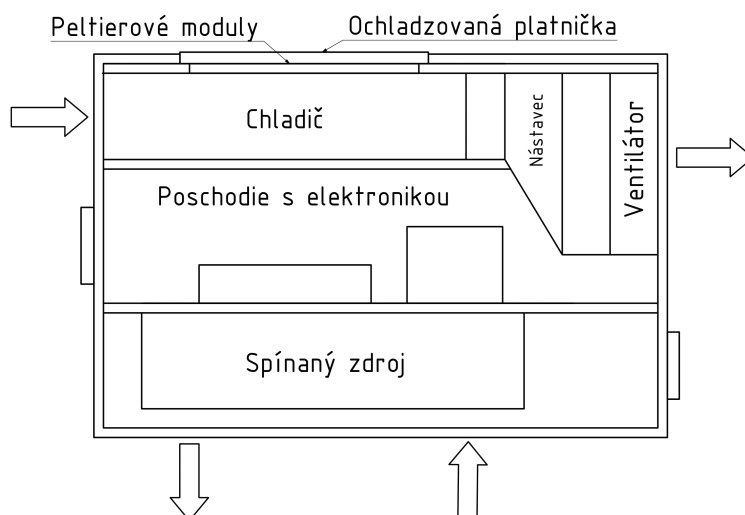
(b) Kolískový spínač [42]

Obrázok 4.18: Ovládacie komponenty zariadenia

aby bolo možné pripojiť zariadenie na elektrickú sieť pomocou EURO napájacieho kábla. Pre sprostredkovanie prepojenia svoriek tlačidiel, zdroja, IEC konektora a kolískového spínača s vodičmi boli zvolené konektory Faston a káblové vidlice LY.

4.3 Vnútorne usporiadanie

Nakoľko sú známe všetky komponenty, návrh pokračuje ich vnútorným rozložením. Forma zariadenia pozostáva zo skrinky v tvare kvádra a uloženie komponentov je znázornené na obrázku 4.19. Šípkami sú označené hlavné prúdy vzduchu. Zariadenie využíva axiálne umiestnený ventilátor. Z užívateľského hľadiska je potrebné zaistiť, aby teplý vzduch nefúkal priamo na používateľa. Možné uloženie ventilátora bližšie k prednej strane zariadenia by uberalo priestor pre umiestnenie ovládacieho panela a platnička by sa na zariadení nachádzala ďalej z dosahu. Z tohto dôvodu bude ventilátor umiestnený vo vzdialenejšej časti tak, aby nasával vzduch z priestoru pred užívateľom cez predný otvor, prehnal ho cez rebrá chladiča a vyfukoval preč z dosahu užívateľa cez zadnú šachtu. Týmto spôsobom zároveň pod chladičom vznikne priestor, ktorý poslúži na umiestnenie elektronických komponentov. V najnižšom poschodí bude umiestnený spínaný zdroj. Disponuje vlastným ventilátorom, preto budú v spodnej doske umiestnené dve šachty na prívod a odvod vzduchu. Vzhľadom na veľkosť všetkých komponentov boli celkové rozmery zariadenia stanovené ako 19x30x20 cm.

**Obrázok 4.19:** Schéma zariadenia (bočný pohľad)

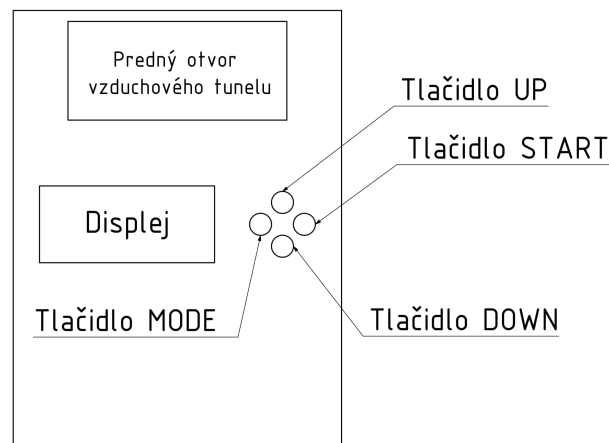
4.4 Umiestnenie ovládacích prvkov

Vybrané komponenty pre ovládanie boli popísané v podkapitole 4.2 a teraz si ukážeme ich umiestnenie. Napájací kábel je na zadnej strane, aby po pripojení na IEC C14 konektor nezavadzal a smeroval preč od používateľa. Ventilátor je spustený vždy, aj keď zariadenie práve nechladí, aby mohol chladič neustále odvádzať teplo. Je preto vhodné, aby sa spustil hneď, ako je zariadenie pripojené na sieť, čo určí zapnutie kolískového spínača. Nakoľko je tento úkon potrebné vykonať len na začiatku a konci používania zariadenia, spínač je umiestnený hneď vedľa IEC C14 konektora. Umiestnenie spínača a konektora je bližšie znázornené na obrázku 4.20. LCD displej



Obrázok 4.20: Umiestnenie ovládania na zadnej stene

a tlačidlá sú umiestnené na prednej stene tak, aby na ne používateľ videl a mohol ich ovládať (viď obrázok 4.21). Farby tlačidiel nemajú komunikačný význam a sú zvolené len pre ich odlíšenie. Modré tlačidlo MODE je umiestnené vľavo a zelené tlačidlo START vpravo. Intuitívne, biele tlačidlo UP je umiestnené hore a biele tlačidlo DOWN dole. Tlačidlá sú umiestnené napravo od displeja, nakoľko väčšina ľudí bude pri ovládaní používať pravú ruku.



Obrázok 4.21: Umiestnenie ovládania na prednej stene

4.5 Riadiaci program

Riadiaci program naprogramovaný pomocou prostredia Arduino IDE je dostupný v elektronickej prílohe. Dá sa rozdeliť na dve časti. Prvou je inicializácia, kde dôjde k zadefinovaniu premenných a vykonaniu nevyhnutných operácií pre štart. Druhou časťou je slučka vykonávajúca pokyny, ktoré sa neustále opakujú. Premenné, ktoré si používateľ môže nastaviť, sú cieľová teplota (`set_temperature`) o hodnotu 1 °C v rozmedzí 12 až 18 °C a časomiera (`set_time`) o hodnotu 30 s v rozmedzí 1 až 5 minút. Riadiaci program bližšie popisuje vývojový diagram na obrázku 4.22. Používateľ môže zariadenie dostať do štyroch stavov s typickým zobrazením na displeji (viď príloha B). V počiatočnom stave (nepřítomnosť ostatných stavov) je zobrazená nastavená teplota a časomiera. Počas stavu nastavovania časomier sa zobrazuje na displeji kurzor, aby používateľ vedel, že ju práve nastavuje. Rovnaký efekt má aj stav nastavovania cieľovej teploty. Počas obidvoch nastavovacích stavov je možné vidieť aktuálne menené hodnoty. V stave chladenia sa na displeji zobrazuje odpočítavanie a prebiehajú operácie pre teplotnú reguláciu platničky.

4.5.1 Meranie teploty platničky

Napätie NTC termistora je snímané na analógovom pine Arduina s 10 ms intervalom a vždy po získaní nových piatich hodnôt napätia sa zo vzoriek stanovuje priemerná hodnota napätia U_p . Interval bol zvolený čo najmenší pre rýchlejšie a presnejšie výpočty, avšak získanie aktuálnej teploty bude limitované časovou konštantou senzoru. Tú výrobca neuvádza. Vďaka rovnici pre delič napätia je možné vypočítať odpor NTC termistora ako

$$R = \frac{R_{ref}}{\frac{U_{1023}}{U_p} - 1}, \quad (4.6)$$

kde R_{ref} je referenčné napätie NTC termistora a U_{1023} predstavuje maximálnu numerickú hodnotu 1023 pre snímaný analógový signál. Hodnota odporu môže byť prevedená na teplotu v stupňoch Celzia pomocou β -rovnice v upravenom tvare

$$T = \frac{\beta}{\frac{\beta}{T_0 + 273,15} + \log\left(\frac{R}{R_0}\right)} - 273,15. \quad (4.7)$$

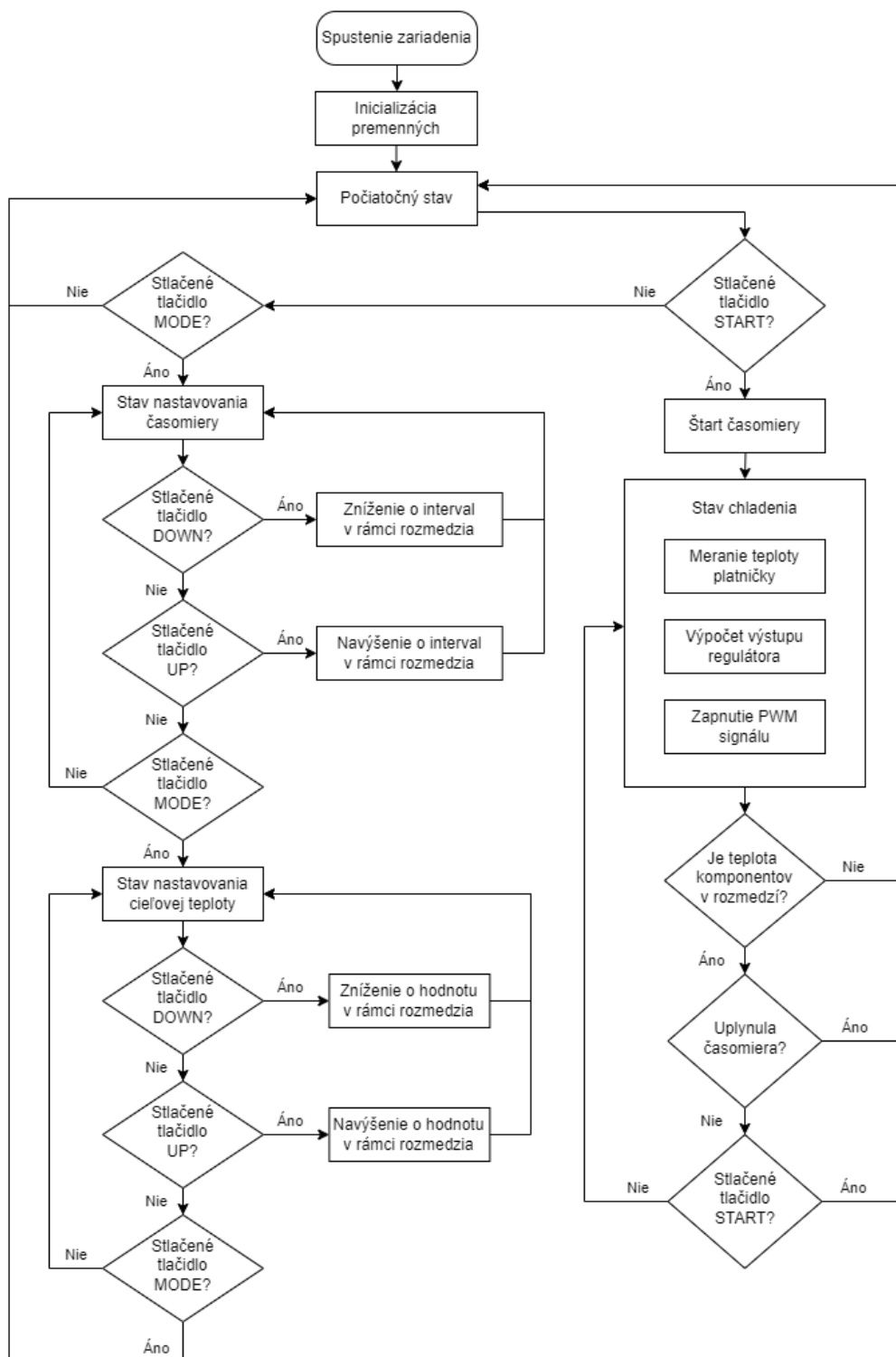
Presnosť takto nameranej teploty nie je bližšie určená, avšak závisela by na použití senzore, zapojení, vyhodnocovacej metóde a možnej prítomnosti elektromagnetického rušenia.

4.5.2 PID regulátor

Obecná rovnica PID regulátora je daná ako

$$u_t = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de}{dt}, \quad (4.8)$$

kde u_t je akčná veličina, K_p proporčná zložka, K_i integračná zložka, K_d derivačná zložka a e_t regulačná odchýlka, ktorá sa spočíta ako rozdiel nastavenej a aktuálnej teploty. Základný PID regulátor je pomerne ľahké zostaviť, avšak pre Arduino platformu existujú knižnice, ktoré použitie uľahčujú. U mnohých ale nie je bližšie



Obrázok 4.22: Vývojový diagram riadiaceho programu (vytvorené pomocou draw.io)

vyvetlené, ako boli naprogramované. Z tohto dôvodu bol v riadiacom programe použitý kód pre PID regulátor od Bretta Beaugarda [43]. Umožňuje rozšírenie o mnohé funkcionality, vybrané boli nasledovné:

- rovnomernosť vzorkovacieho času,
- odstránenie problému *derivative kick*,

- možnosť zmeny parametrov za chodu,
- odstránenie problému *reset windup*.

4.5.3 Použité knižnice

Tlačidlá, ktoré zariadenie využíva, v ideálnom prípade sprostredkujú kontakt, pri ktorom dôjde k hladkému prechodu napätia z nízkej hladiny na vysokú alebo naopak. V skutočnosti ale môže dôjsť k náhodnému zakmitávaniu tlačidiel, kedy by mohlo byť jednorázové stlačenie tlačidla nesprávne interpretované. Tento problém je možné vyriešiť rôznymi hardwarovými alebo softwérovými technikami. V riadiacom programe bola za týmto účelom použitá knižnica PushButton [44].

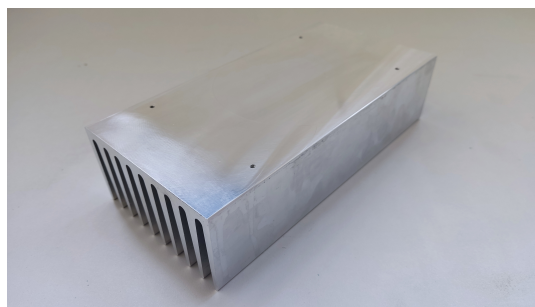
Komunikácia s displejom je realizovaná pomocou I2C zbernice. Knižnice, ktoré umožňujú komunikáciu a ovládanie displeja, sú LiquidCrystal_I2C a Wire. Bližší popis ako s nimi pracovať, je rozpísaný v návode od DroneBot Workshop [45].

Digitálne čidlo DS18B20+ meriace teplotu H-mostíkov používa knižnice OneWire a DallasTemperature [40].

Kapitola 5

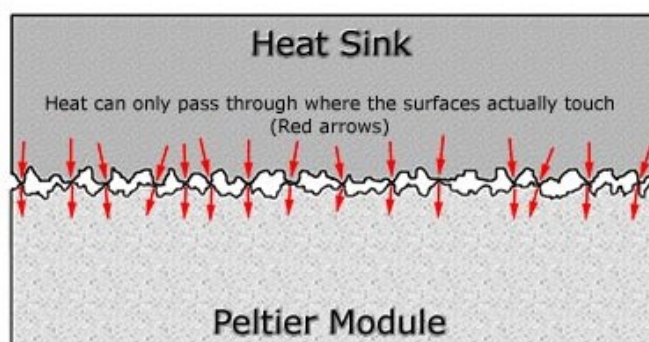
Konštrukcia zariadenia

Na začiatku je potrebné navrtať do chladiča závitové diery. Celý povrch podstavy chladiča je frézovaný, nakoľko bolo zistené, že bol ohnutý. Zaistia sa tak priaznivejšie tolerancie pre uloženie všetkých modulov. Upravený chladič je na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1: Chladič po úpravách

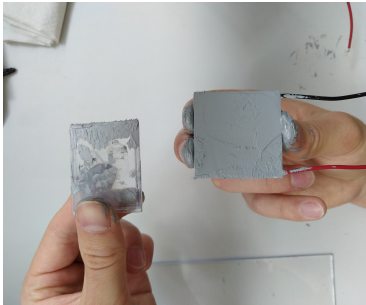
Výroba pokračuje inštaláciou Peltierových modulov. Pri priamom položení modulov na chladič je pomocou mikroskopu možné vidieť, že aj napriek tomu, že plochy vyzerajú rovno, obsahujú veľké množstvo nerovností (viď obrázok 5.2). Voľné miesta



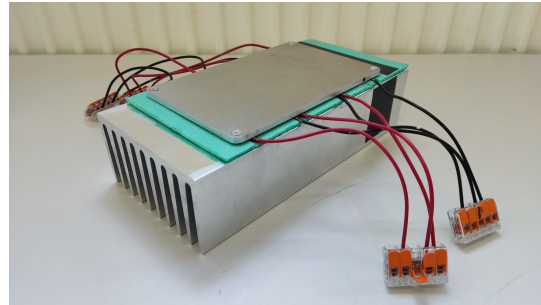
Obrázok 5.2: Mikroskopický pohľad na rozhranie modulov a chladiča [46]

vyplňa vzduch, ktorý izoluje a teplo sa prenáša hlavne v kontaktných bodoch. [46] Aby tomuto nežiaducemu javu bolo možné zabrániť, je nevyhnutné použitie termálnej pasty. Zvolená bola 20 gramová pasta ARCTIC MX-4 [47]. Pre odhadnutie jej potrebného množstva bol použitý výpočtový nástroj výrobcu Kooling Monster [48].

Vypočítané množstvo bolo 12 gramov, avšak po aplikácii sa ukázalo, že spotrebovaných bolo len približne 8 gramov. Nakoľko sa pasta ťažšie rozotiera, používajú sa rôzne metódy jej nanosenia. V tomto prípade je použitá metóda Butter Toast (viď obrázok 5.3), kde sa pasta rovnomerne aplikuje pomocou špachtle. Na obrázku 5.3 b) je možné vidieť výsledok inštalácie s umiestnenou platničkou.



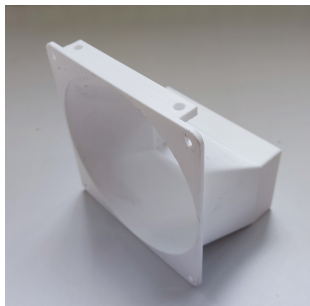
(a) Metóda Butter Toast



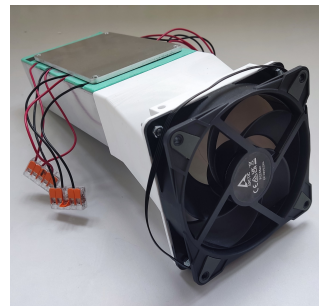
(b) Výsledok

Obrázok 5.3: Inštalácia Peltierových modulov

Pomocou technológie 3D tlače bol vytvorený nástavec, ktorý prepája ventilátor a chladič (viď obrázok 5.4).



(a)



(b)

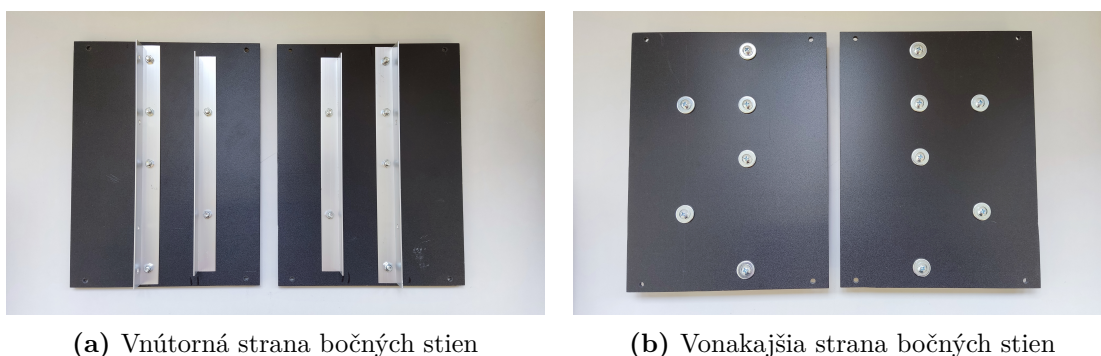
Obrázok 5.4: Nástavec prepájajúci chladič a ventilátor

Základným nosným prvkom zariadenia sú stĺpiky vytvorené pomocou 3D tlače na obrázku 5.5.

**Obrázok 5.5:** Nosné stĺpiky

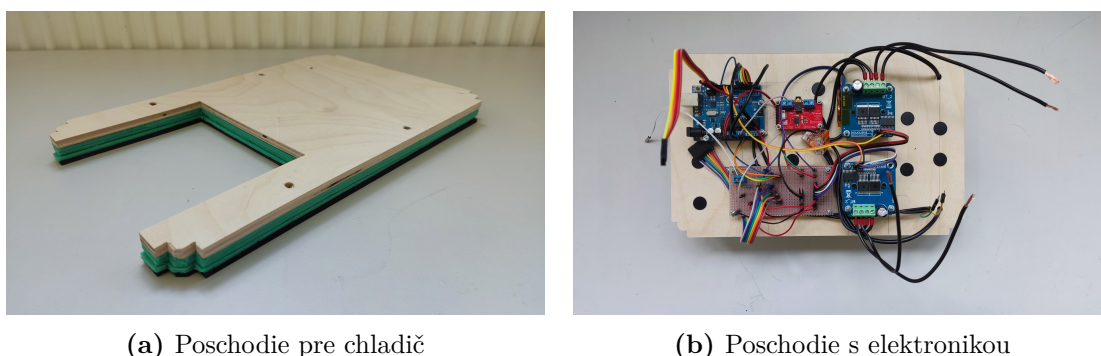
Bočné steny zariadenia sú vyrobené z peneného PVC o hrúbke 5 mm [49]. Sú na nich umiestnené lišty narezané z hliníkového L profilu [50], ktoré držia jednotlivé poschodia. Umiestnenie šróbových spojov bolo v prípade poschodia, ktoré bude

niest chladič, posunutú z dôvodu jeho hmotnosti. Všetky šróbové spoje schránky zariadenia pozostávajú z M5 šróbov a matíc, v niektorých prípadoch aj podložiek. Na obrázku 5.6 je možné vidieť zhotovené bočné steny.



Obrázok 5.6: Bočné steny

Chladič je položený na poschodí tvorenom viacerými vrstvami (viď obrázok 5.7 a)). Pre zaistenie pevnosti je použitá brezová preglejka s hrúbkou 6 mm. Tri vrstvy 3 mm izolácie Arbiton zabráňujú prenosu tepla z chladiča do iných častí zariadenia. Posledná PVC doska čiernej farby s hrúbkou 3 mm má čisto estetický účel. Poschodie s elektronikou je položené na rovnakej brezovej preglejke. Už na ňom zapojenú a umiestnenú elektroniku je možné vidieť na obrázku 5.7 b). Detail umiestnenia teplotných senzorov je v prílohe A.



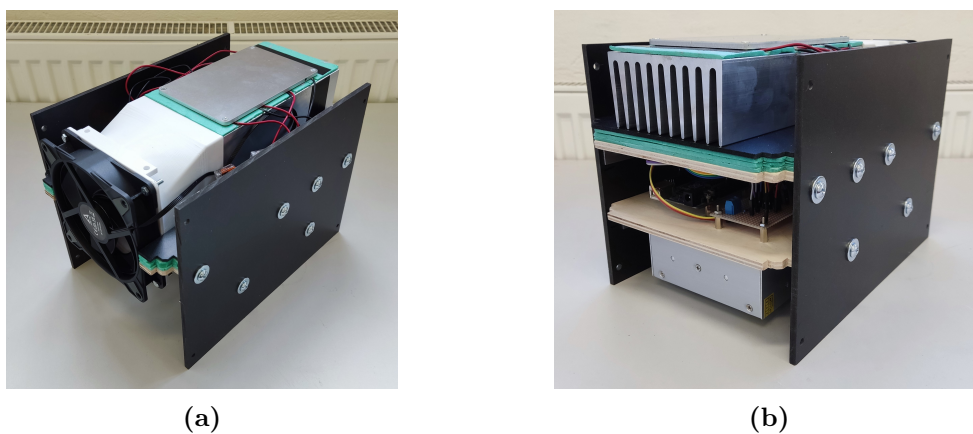
Obrázok 5.7: Poschodia zariadenia

Po spojení a vložení zatiaľ spomenutých komponentov je priebeh montáže zobrazovaný na obrázku 5.8. V tomto stave bolo zariadenie zároveň testované, nakoľko po založení prednej a zadnej steny už nie je možné dostať sa do jeho vnútra. Následne je možné pokračovať v pripevnení nosných stĺpikov.

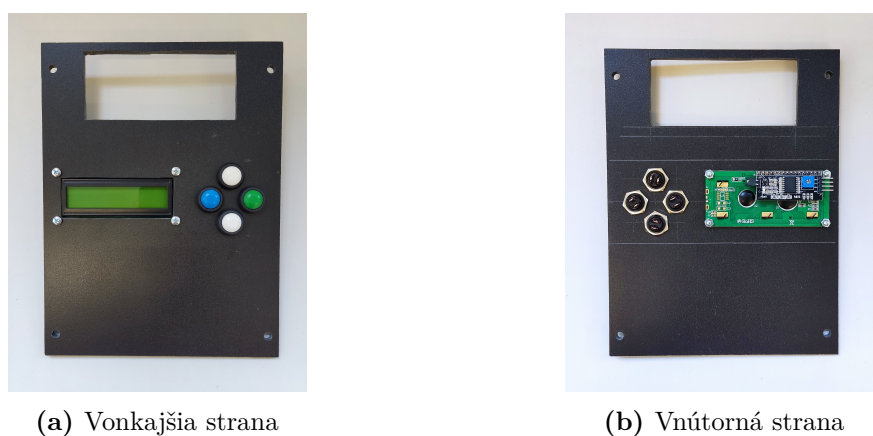
Návrh prednej a zadnej steny je bližšie popísaný v podkapitole 4.4. Otvor prednej steny je vyrezaný a chladič je ponechaný odhalený (viď obrázok 5.9). Na zadnej stene je otvor pre prúdiaci vzduch taktiež vyrezaný, avšak ventilátor je chránený mriežkou zhotovenou na 3D tlačiarňi (viď obrázok 5.10).

Konštrukcia zariadenia je dokončená prišrôbovaním spodnej a vrchnej steny na obrázku 5.11. Spodná stena má vyrezané otvory pre šachty, cez ktoré prúdi vzduch ochladzujúci spínaný zdroj.

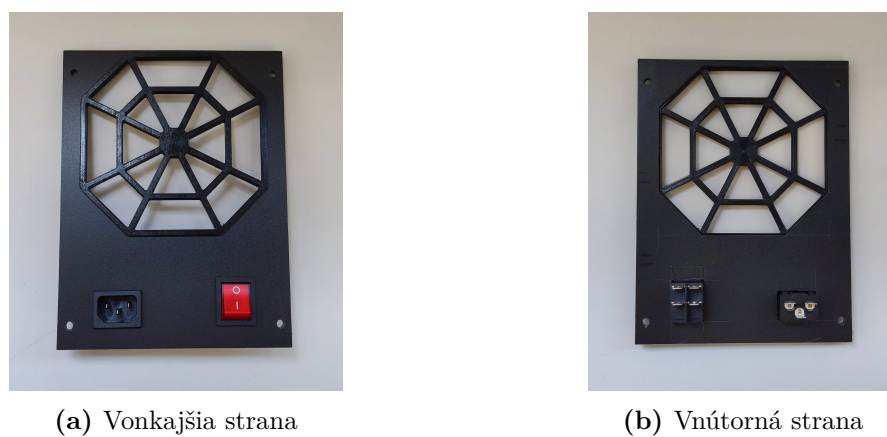
Úspešné zhotovenie prototypu zariadenia je možné vidieť na obrázku 5.12.



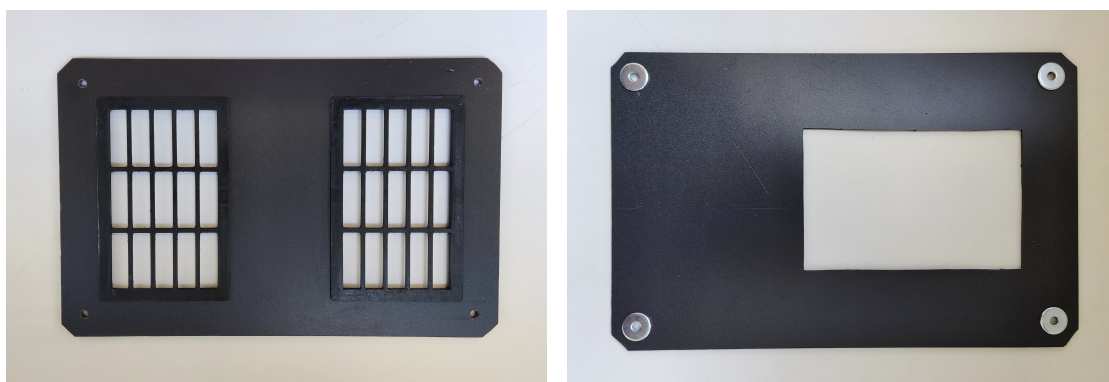
Obrázok 5.8: Pribeh montáže



Obrázok 5.9: Predná stena



Obrázok 5.10: Zadná stena



(a)

(b)

Obrázok 5.11: Spodná a vrchná stena



(a) Pohľad zpredu



(b) Pohľad zozadu

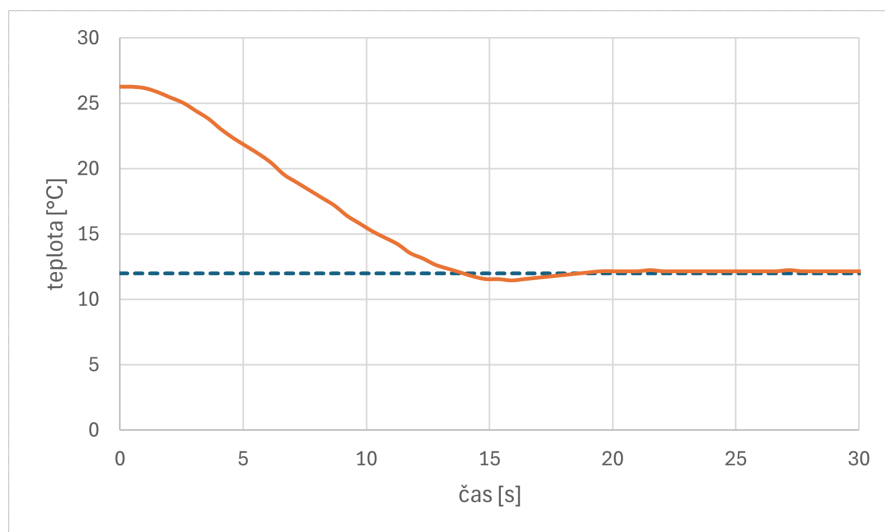
Obrázok 5.12: Finálne vyhotovenie

Kapitola 6

Regulácia teploty a testovanie

Na začiatku bolo potrebné správne nastaviť PID regulátor, konkrétne jeho jednotlivé zložky. Vzhľadom na to, že dynamika systému nie je presne známa, použitie sofistikovanejších metód (Ziegler-Nicholson, Åström-Hägglund) by mohlo byť rizikové. Z dôvodu zvýšenej opatrnosti sú preto konštanty stanované odhadom. Cieľom regulácie je dosiahnuť teplotu 12°C. Výskyt mierneho prekmitu nie je problémový, nakoľko postačuje, že teplota v stave maximálneho preregovania bude vyššia než je dolná hranica teploty pre metódu chladenia dlaní.

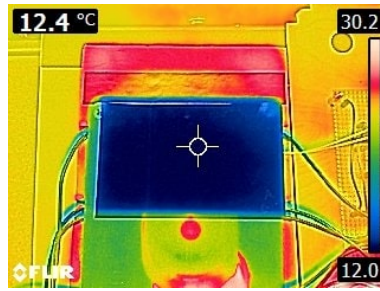
Prvotné stanovovanie konštant prebiehalo tak, že komponenty boli položené mimo skrine, aby bolo možné monitorovať teplotu H-mostíkov. Najprv bola postupným zvyšovaním odhadnutá hodnota $K_p = 100$. Naledovalo zvyšovanie integračnej zložky až na $K_i = 2$, kým trvalá regulačná odchýlka nebola minimálna. Nakoniec bola nastavená hodnota $K_d = 20$ tak, aby sa regulovaná teplota dostala do tolerančného pásma čo najrýchlejšie a bez ďalších prekmitov. Výsledky takto nastaveného regulátora znázorňuje graf na obrázku 6.1. Hodnota regulovanej teploty sa po uplynutí 20 sekúnd pohybovala okolo hodnoty 12,2 °C. Dáta, pomocou ktorých bol tento ale aj iné grafy vytvorené, sú uvedené v elektronickej prílohe.



Obrázok 6.1: Regulácia teploty s komponentami mimo skrine

Výsledky namerané NTC senzorom potvrdila aj snímka z kamery na obrázku 6.2. Zároveň sa podarilo skontrolovať teplotu H-mostíkov (viď obrázok 6.3).

Po uložení do skrine sa potvrdil efekt elektromagnetického rušenia, ktorý bude

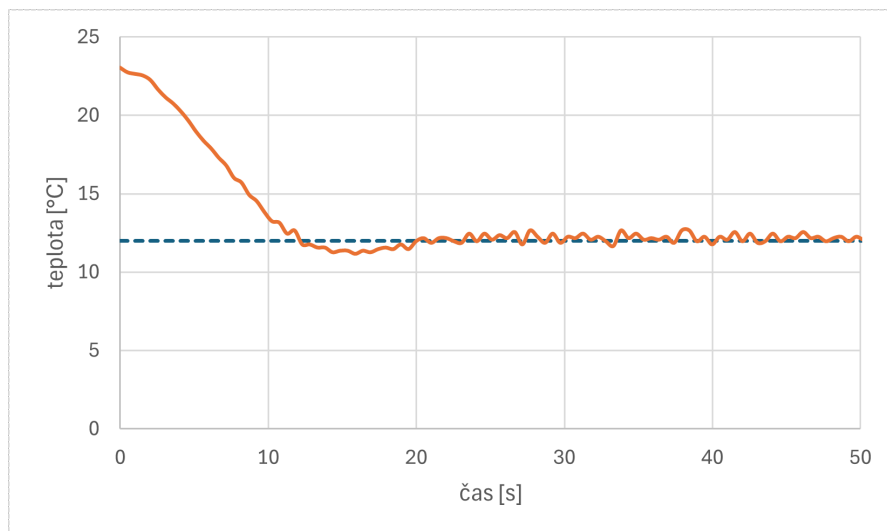


Obrázok 6.2: Snímka platničky z termokamery



Obrázok 6.3: Snímka H-mostíka z termokamery

najviac ovplyvnený tým, že káble, ktoré napájajú Peltierove moduly, prechádzajú cez káble NTC termistora. V budúcnosti je možné tomuto predísť iným rozmiestnením vodičov. Prejav na regulovanej teplote zachycuje graf na obrázku 6.4.

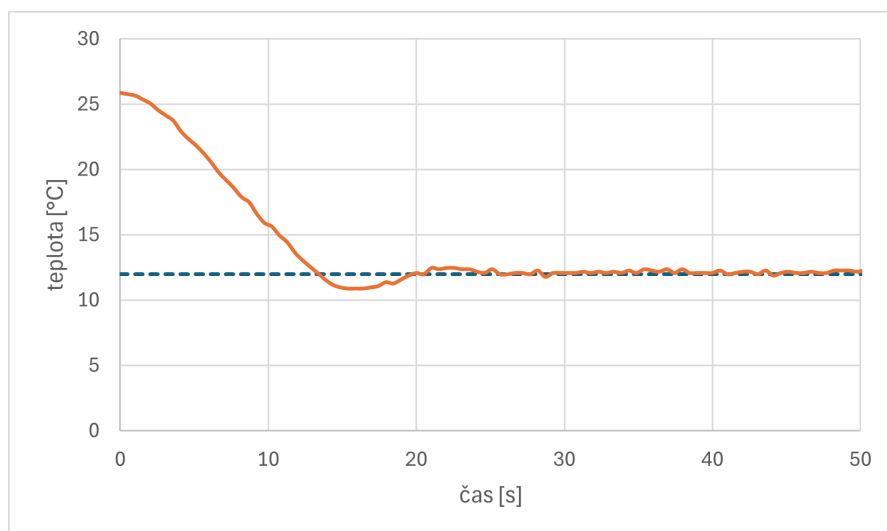


Obrázok 6.4: Regulácia teploty s komponentami v skrini

V snahe minimalizovať tento nežiaduci efekt je v riadiacom programe nastavené vypnutie PWM signálu vždy pred snímaním teploty. Výsledok regulácie po tejto úprave je viditeľný v grafe na obrázku 6.5.

Nasledovalo testovanie regulácie s dlaňou položenou od začiatku chladiaceho cyklu. Zvolené umiestnenie dlane je na obrázku 6.6 a graf, ktorý znázorňuje priebeh, je na obrázku 6.7. Po ustálení sa teplota platničky pohybovala okolo 12,3 °C.

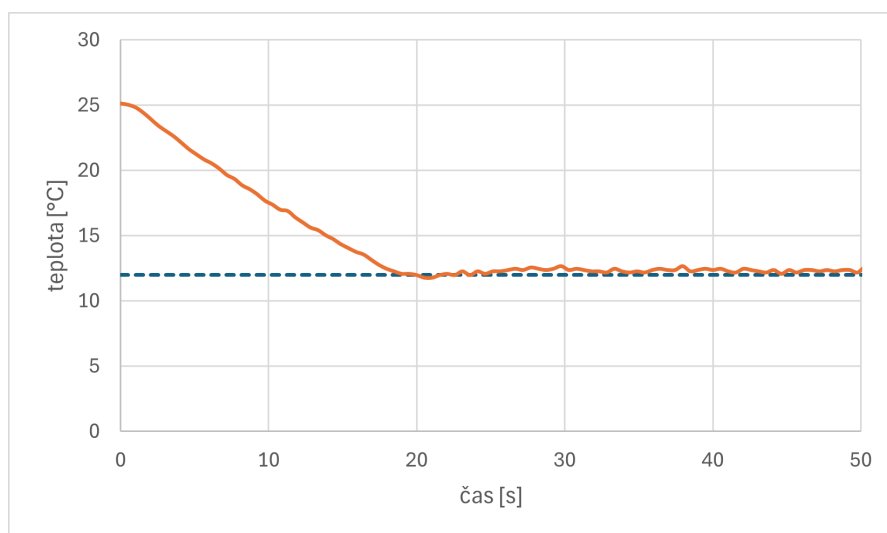
Ďalej bolo otestované položenie dlane na podložku až po dosiahnutí ustáleného stavu. Výsledky sú opäť znázornené v grafe na obrázku 6.8. Modrý bod určuje okamih položenia dlane.



Obrázok 6.5: Regulácia teploty s komponentami v skrini po úprave programu

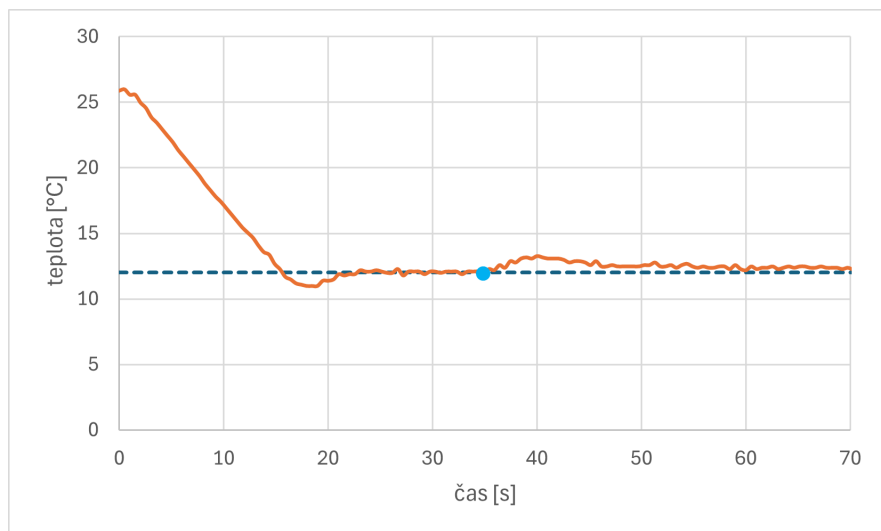


Obrázok 6.6: Odporúčané umiestnenie dlane pri používaní



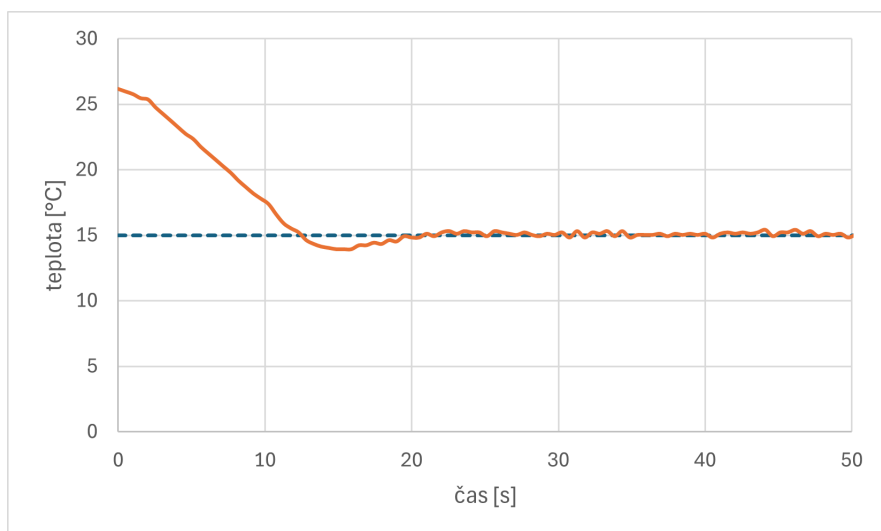
Obrázok 6.7: Regulácia teploty s dlaňou položenou od začiatku cyklu

Počas ďalších testov sa ukázalo, že pri vypnutí zariadenia dochádza k spätnému prestupu tepla do platničky. V niektorých prípadoch, ako napríklad dlhších cykloch, nižších nastavených teplôt alebo menších prestávkach medzi cyklami, sa môže teplo v celej sústave hromadiť. Zatiaľ je preto odporúčané zariadenie týmto podmienkam často nevystavovať.



Obrázok 6.8: Regulácia teploty s dľaňou položenou 10 sekúnd po ustálení

Otestované boli aj iné teplotné nastavenia. Pre ukážku bola zvolená regulácia s nastavenou teplotou 15 °C v grafe na obrázku 6.9.



Obrázok 6.9: Regulácia teploty na hodnotu 15°C

Kapitola 7

Cenová rozvaha

Cielom ekonomickej rozvahy je poukázať na náklady súčiastok a materiálu potrebných pre výrobu prototypu zariadenia. Ak by boli zvolené iné metódy výroby alebo komponenty, je rozumné predpokladať, že náklady na výsledné zariadenie by mohli byť podobné nákladom na prototyp. Náklady by sa mohli ďalej znížiť vďaka množstevným zľavám, doprave a iným faktorom, ktoré optimalizujú výrobu.

Náklady na elektrické súčiastky činili 4325,7 Kč (viď tabuľka 7.2) a materiálové náklady 3202,8 Kč (viď tabuľka 7.1). Výrobná réžia a náklady na dopravu nie sú zahrnuté. Všetky ceny sú uvedené s DPH. Celkové náklady dosiahli sumu 7528,5 Kč, čo je po prepočte v čase písania práce 304,72 eur alebo 330,58 amerických dolárov. U navrhnutého zariadenia je možné predpokladať nezanedbateľnú mieru konkurencieschopnosti oproti súčasne dostupným profesionálnym alternatívam uvedených v podkapitole 2.3.

Položka	Cena [Kč]	Počet	Celkom [Kč]
Hliníková platnička	726	1	726
Chladič	242	1	242
Pasta ARCTIC MX-4	259	1	259
Dištančný stĺpik M3x10	5,6	8	44,8
Dištančný stĺpik M3x25	9	8	72
PVC doska 5 mm 50x100 cm	462	1	462
PVC doska 3 mm 50x50 cm	185	1	185
Preglejka 6mm 30x50 cm	148	1	148
Dverná zarážka	35	4	140
Izolácia Arbiton 3mm (1 m ²)	29	1	29
Gram 3D tlač	2	250	500
Spojovací materiál	250	1	200
Hliníkový profil typu L	95	1	95
Iný materiál	100	1	100
Súčet			3202,8

Tabuľka 7.1: Náklady na materiál

Položka	Cena [Kč]	Počet	Celkom [Kč]
Peltierov modul TEC-12706	217,55	6	1305,3
Ventilátor Arctic P12 MAX	199	1	199
Spínaný zdroj S-500-12	898	1	898
H-mostík BTS7960B	197	2	394
Arduino Uno Rev3	698	1	698
LCD displej 16x2	98	1	98
NTC termistor	147,96	1	147,96
Senzor DS18B20+	68	1	68
Tlačidlo PBS-33B	29	4	116
Kolískový spínač	26	1	26
WAGO svorka 221-413	15,6	2	31,2
WAGO svorka 221-415	25	4	100
DuPont kábel	1	50	50
Vodič 1,5 mm ² (1 m)	6,5	2	13
Vodič 4 mm ² (1 m)	15	1	15
IEC C14 konektor	22	1	22
Napájecí kábel EURO	83	1	83
Rezistor	2	6	12
Káblková vidlica LY	1,65	9	14,85
Svorkovnica	5	1	5
Konektor Faston 1670	1,63	8	13,4
Konektor Faston 674	3,2	5	16
Súčet			4325,7

Tabuľka 7.2: Náklady na elektrické súčiastky

Záver

V práci bolo najprv predstavené chladenie dlaní, jeho experimentálne výsledky a súčasne dostupné produkty, ktoré ho dokážu sprostredkovať. Ďalej boli vysvetlené základné princípy termoelektrického chladenia, na ktorých sú postavené Peltierove moduly, ktoré boli použité v zariadení. V rámci návrhu bol odôvodnený výber všetkých podstatných komponentov pre tvorbu prototypu. Zvolený postup návrhu termálneho systému sa dá uplatniť aj pri iných aplikáciách, nakoľko je pomerne rýchly a nevyžaduje časovo a ekonomicky náročnejšie metódy. Následne bol navrhnutý riadiaci program a určené umiestnenie komponentov tak, aby bolo zohľadnená ergonómia zariadenia. Po dokončení konštrukcie sa pokračovalo nastavením PID regulátora a testovaním zariadenia. Ukázalo sa, že chladenie dlaní, ktoré zariadenie sprostredkuje, v rámci možností splňa všetky stanované parametre. Na záver bola vykonaná ekonomická rozvaha, ktorá predbežne stanovila cenu nákladov na výrobu prototypu v hodnote 7528,5 českých korún. V prípade sériovej výroby zariadenia by mohli byť náklady podobné, čo by umožnilo konkurovať profesionálnejším zariadeniam, ktoré sú momentálne dostupné na trhu.

Navrhnutý prototyp môže momentálne poslúžiť na propagačné účely a budovanie povedomia o metóde chladenia dlaní. Pri jeho dlhodobom používaní v neštandardných podmienkach môže dôjsť k tomu, že nebude stíhať odvádzať dostatočné množstvo tepla. V ďalšej iterácii sa tento negatívny jav dá odstrániť použitím lepších komponentov. Tie tentokrát použité neboli z ekonomických dôvodov. Momentálne je odporúčané používať prototyp len pod dohľadom poučenej osoby. V čase písania práce neexistujú alternatívy podobné navrhnutému zariadeniu, ktoré by boli komerčne dostupné. Bakalárska práca pomôže ďalšiemu vývoju zariadenia podobného typu so zameraním na jeho účinnosť a užívateľskú prívetivosť.

Bibliografia

1. WALKER, Thomas B; ZUPAN, Michael F; MCGREGOR, Julia N; CANTWELL, Andrew R; NORRIS, Torrance D. Is performance of intermittent intense exercise enhanced by use of a commercial palm cooling device? *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2009, roč. 23, č. 9, s. 2666–2672.
2. WAVERLYPINE. *Interview with Craig Heller* [vid. 24.5.2024]. 2021. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=p_sSjMJIi0A&ab_channel=WaverlyPine.
3. ZHANG, Mengying. *Computational modeling and simulation of hand-specific heat transfer and thermoregulation during cold stress*. 2021. Diz. pr. Iowa State University.
4. GRAHN, Dennis A; CAO, Vinh H; NGUYEN, Christopher M; LIU, Mengyuan T; HELLER, H Craig. Work volume and strength training responses to resistive exercise improve with periodic heat extraction from the palm. *The Journal of Strength & Conditioning Research*. 2012, roč. 26, č. 9, s. 2558–2569.
5. °Coolmitt [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <https://coolmitt.myshopify.com/pages/how-it-works>.
6. *CoreTx Thermal Exchange* [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <https://www.coretxcooling.com/coretx-palm-cooling/>.
7. DIMITROPOULOS, Stav. *Palm cooling comes of age* [vid. 24.5.2024]. 2023. Dostupné z: <https://proto.life/2023/03/palm-cooling-comes-of-age/>.
8. *Apex Cool Labs* [vid. 24.5.2024]. 2023. Dostupné z: <https://www.apexcoolabs.com/pages/faq>.
9. *AVA Cooling Technology* [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <https://www.avacooling.com/products/af-charge-bar>.
10. *Black Ice CülCan Palm Cooling System* [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <https://blackicecooling.com/culcan-palm-cooling/>.
11. SEDLÁK, B; ŠTOLL, I. *Elektrina a magnetismus*. Praha: Academia, 2002.
12. TRITT, Terry M. *Thermoelectric materials: Principles, structure, properties, and applications*. 2002.
13. KRÁLOVÁ, Magda. *Termoelektrické jevy* [vid. 24.5.2024]. 2007. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/termoelektricke-jevy>.
14. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Seebeckův jev* [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/910-seebeckuv-jev>.

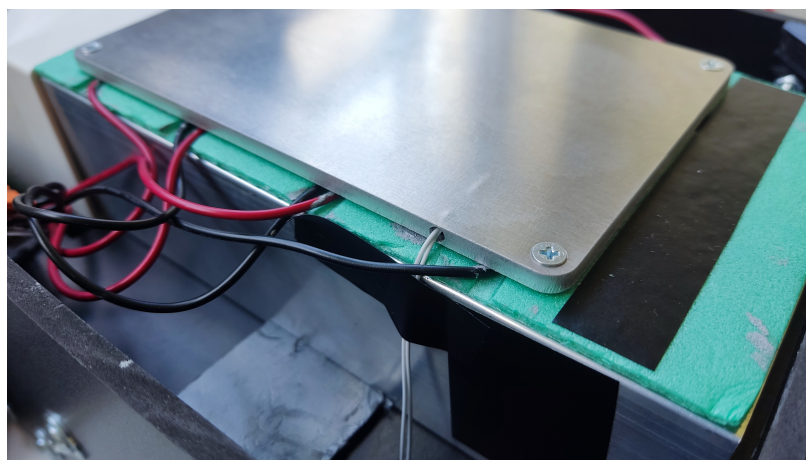
15. REICHL, Jaroslav; VŠETIČKA, Martin. *Peltierov jev* [vid. 24.5.2024]. 2024. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/911-peltieruv-jev>.
16. THAKKAR, Mohit. *A report on "Peltier (thermoelectric) cooling module"* [vid. 24.5.2024]. 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Peltier-cooling-by-couple-of-N-P-10_fig7_292976771.
17. *Basic Principles of Thermoelectric Modules & Materials* [vid. 24.5.2024]. FerroTec, 2024. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref02/>.
18. *Working Principle* [vid. 24.5.2024]. BLOGS@NTU, 2024. Dostupné z: <https://blogs.ntu.edu.sg/ps9888-2020-g09/working-principle/>.
19. *Peltier Elements* [vid. 24.5.2024]. MeerStetter Engineering, 2024. Dostupné z: <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/70-peltier-elements>.
20. *What TEC do I have?* [vid. 24.5.2024]. Custom Thermoelectric, 2024. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/te-encyclopedia/what-tec-do-i-have.html>.
21. *Peltier modules* [vid. 24.5.2024]. Quick-Ohm, 2024. Dostupné z: https://www.heat-management.info/peltier_elements/peltier-module.html.
22. ROSEN, David I.; MAGILL, John C.; LEGNER, Hartmut H. *Cooling Glove Study* [vid. 24.5.2024]. Defense Technical Information Center, 2007. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/te-encyclopedia/what-tec-do-i-have.html>.
23. *Advantages of Thermoelectric Cooling* [vid. 24.5.2024]. Ferrotec, 2024. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref04/>.
24. *ANTHROPOMETRY AND BIOMECHANICS* [vid. 24.5.2024]. NASA, 2024. Dostupné z: <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm>.
25. *TEC1-127060S peltierův článek* [vid. 24.5.2024]. GM electronic, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1482965/tec1-127060s-peltieruv-clanek>.
26. *Hliníkový chladič 100x51 3M* [vid. 24.5.2024]. ehlinik.cz, 2024. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinikovy-chladic-100x51-3m/pro-00T0000101.html>.
27. *Advanced Plate Fin Heat Sink Calculator* [vid. 24.5.2024]. MyHeatSinks, 2024. Dostupné z: <https://myheatsinks.com/calculate/plate-fin-heat-sink-calculator/>.
28. *Peltier Element Efficiency* [vid. 24.5.2024]. MeerStetter Engineering, 2024. Dostupné z: <https://www.meerstetter.ch/customer-center/compendium/71-peltier-element-efficiency>.
29. *COP of a Thermoelectric Cooler (TEC)* [vid. 24.5.2024]. Thermal Book, 2024. Dostupné z: <https://thermalbook.wordpress.com/cop-of-a-thermoelectric-cooler-tec/>.

30. *P12 Max* [vid. 24.5.2024]. Arctic GmbH, 2024. Dostupné z: <https://www.arctic.de/en/P12-Max/ACFAN00280A>.
31. *LYONZG S-500-12 modulový napájecí 230V AC-DC zdroj 12V/41A 500W* [vid. 24.5.2024]. LaskaKit, 2024. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/lyonzg-s-500-12-modulovy-napajeci-230v-ac-dc-zdroj-12v-41a-500w/>.
32. *H můstek - BTS7960B, DC 43A* [vid. 24.5.2024]. dratek.cz, 2024. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/1647-bts7960b-h-mustek-dc-43a.html>.
33. *Arduino Uno rev3, originál* [vid. 24.5.2024]. LaskaKit, 2024. Dostupné z: https://www.laskakit.cz/arduino-uno-rev3--original/?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwrvyxBhAbEiwAEg_KgtjR-otPAEJRzERrc3GSM5faazBxIfiVsZqffXcb_C_JkaK79g1BNRoCoIcQAvD_BwE.
34. *16x2 LCD displej 1602 zelený + I2C převodník* [vid. 24.5.2024]. LaskaKit, 2024. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/16x2-lcd-displej-1602-zeleny-i2c-prevodnik/>.
35. *TT4-G10KC8-T180-C312-200* [vid. 24.5.2024]. TEM Electronic Components, 2024. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/tt4pt100bt180c312/cidla-teploty-odporove/tewa-temperature-sensors/tt4-2249/>.
36. *LaskaKit MAX31865 převodník pro termočlánek PT100/1000* [vid. 24.5.2024]. LaskaKit, 2024. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/laskakit-max31865-prevodnik-pro-termoclanek-pt100-1000/>.
37. *TT4-G10KC8-T180-C312-200* [vid. 24.5.2024]. TEM Electronic Components, 2024. Dostupné z: https://www.tme.eu/cz/details/tt4g10kc8t180c312/teplotni-cidla-termistory-ntc/tewa-temperature-sensors/tt4-g10kc8-t180-c312-200/?brutto=1¤cy=CZK&gad_source=1&gclid=Cj0KCQjw-_mvBhDwARIsAA-Q0Q4BaBZtbZS5TZtKP8DE9iHDmH0kpf9YGL5aMTevU__Kw6tePIv8cTAaAv4yEALw_wcB.
38. JOSEPH, Jobit. *Interfacing NTC Thermistor with Arduino* [vid. 24.5.2024]. 2022. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/interfacing-Thermistor-with-arduino>.
39. *Maxim Integrated DS18B20+ orig. digitální čidlo teploty TO-92* [vid. 24.5.2024]. LaskaKit, 2024. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/dallas-ds18b20--orig--digitalni-cidlo-teploty-to-92/>.
40. SANTOS, Rui. *Guide for DS18B20 Temperature Sensor with Arduino* [vid. 24.5.2024]. 2019. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-ds18b20-temperature-sensor-with-arduino/>.
41. *PBS-33B-G tlačítko do panelu, 1 pól, OFF-(ON)* [vid. 24.5.2024]. GM electronic, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1499854/pbs-33b-g-tlacitko-do-panelu-1-pol-offon>.
42. *IRS-201-1C3-R/B kolébkový spínač* [vid. 24.5.2024]. GM electronic, 2024. Dostupné z: <https://www.gme.cz/v/1499819/irs-201-1c3-r-b-kolebkovy-spinac>.
43. BEAUREGARD, Brett. *Improving the Beginner's PID – Introduction* [vid. 24.5.2024]. 2012. Dostupné z: <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>.

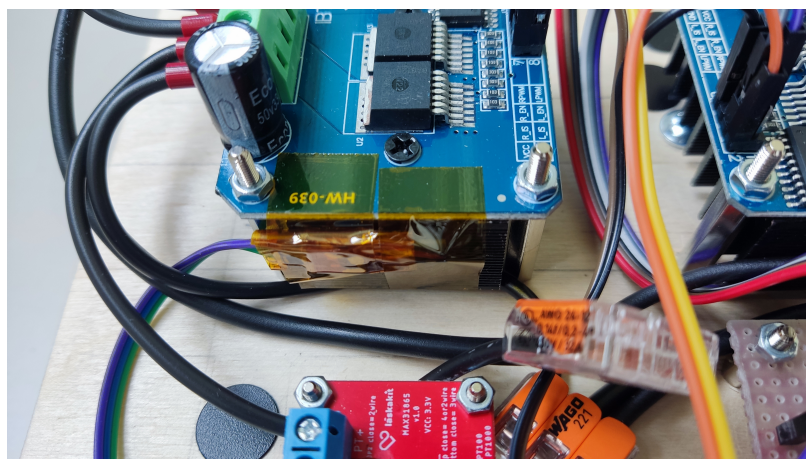
44. POLULU. *pololu/pushbutton-arduino* [vid. 24.5.2024]. 2016. Dostupné z: <https://github.com/pololu/pushbutton-arduino>.
45. *Using LCD Displays with Arduino* [vid. 24.5.2024]. DroneBot Workshop, 2018. Dostupné z: <https://dronebotworkshop.com/lcd-displays-arduino/>.
46. *TEG Installation* [vid. 24.5.2024]. Custom Thermoelectric, 2024. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/install/teg-installation.html>.
47. *ARCTIC MX-4 Thermal Compound (20g)* [vid. 24.5.2024]. alza.cz, 2024. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/install/teg-installation.html>.
48. *Estimate How Much Thermal Paste You Need on CPU/GPU With a Calculator* [vid. 24.5.2024]. Custom Thermoelectric, 2024. Dostupné z: <https://customthermoelectric.com/tech-info/install/teg-installation.html>.
49. *PVC pěněné 5mm, černá, 500x1000mm* [vid. 24.5.2024]. Modelov, 2024. Dostupné z: <https://www.promodely.cz/PVC-penene-5mm-cerna-500x1000mm-d1367.html>.
50. *Alu L profil, přírodní, 20x20x1,5mm, 1m* [vid. 24.5.2024]. Hornbach, 2024. Dostupné z: <https://www.hornbach.cz/p/alu-l-profil-prirodni-20x20x1-5mm-1m/8829165/>.

Prílohy

A Detail umiestnenia senzorov



Obrázok 1: Umiestnenie NTC termistora



Obrázok 2: Umiestnenie senzora DS18B20+

B Režimy LCD panelu



Obrázok 3: Východiskový režim



Obrázok 4: Režim nastavovania času



Obrázok 5: Chladiaci režim

C Elektronické prílohy

C.1 Riadiaci program

C.2 Tabuľky nameraných hodnôt