

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra mikroelektroniky

Chlazení teplotní komory Peltierovými články

Kryštof Smitka

Vedoucí: Prof. Ing. Miroslav Husák CSc.
Obor: Elektrotechnika a komunikace
Květen 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Smitka** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **483882**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Chlazení teplotní komory Peltierovými články

Název bakalářské práce anglicky:

Cooling of the Temperature Chamber by Peltier Cells

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu poznatků řešení chladicích systémů s využitím Peltierových článků.
2. Navrhněte a realizujte model teplotní komory s chlazením pomocí Peltierových článků. Objem komory je cca 1 dm³, napájení = 12 V / cca 200 W, řešte homogenní rozložení teploty v komůrce, pro zvýšení účinnosti použijte vnější chlazení Peltierových článků. Při návrhu se zaměřte na dosažení co nejnižší teploty. Komoru doplňte displejem pro zobrazení vnitřní teploty. Pro měření teploty zvolte vhodný typ teplotního senzoru, pro řízení činnosti použijte vhodný typ kontroléru.
3. Zjistěte dosažené parametry, tj. především nejnižší dosažitelnou vnitřní teplotu vůči vnější teplotě, hysterezi udržování vnitřní teploty systému, rychlost chlazení, přesnost regulace teploty.
4. Proveďte ekonomickou rozvahu navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

1. Červenka, M., Siegr, L., Měření na Peltierově článku, <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/peltier.pdf>
2. Miramanto, M. et al, Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006>
3. Pandey, P. S et al, The Real-Time Hardware Design and Simulation of Thermoelectric Refrigerator System Based on Peltier Effect. <https://rdcu.be/cddtL>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc., katedra mikroelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.01.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **21.05.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2022**

prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Pavel Hazdra, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu prof. Miroslavu Husákovi za cenné rady a připomínky k mé bakalářské práci. Také bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, 21. května 2021

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou návrhu a konstrukce chladicí komory s Peltierovými články. V práci jsou popsány základní fyzikální principy a jevy související s Peltierovým článkem, jenž byl při realizaci výroby chladicí komory stěžejní. V práci je podrobně rozebrán návrh mechanické konstrukce chladicí komory a řídicí elektroniky včetně řídicího algoritmu. Dále je popsán proces sestavení celé komory. Součástí práce je i změření dosažených parametrů komory, předně nejnižší dosažené teploty, která byla $-6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, dále homogenita teploty uvnitř komory a průběh regulace teploty v komoře. V závěru práce je rovněž uvedena ekonomická rozvaha a odhad ceny celého systému.

Klíčová slova: Peltierův článek, termoelektrický jev, chladicí komora, mikrokontrolér, dvoupolohový regulátor

Vedoucí: Prof. Ing. Miroslav Husák CSc.

Abstract

This thesis focuses on the design and construction of a cooling chamber with Peltier cells. The thesis describes the basic physical principles and phenomena related to the Peltier cell, which was crucial in the implementation of the cooling chamber. The thesis deals in detail with the design of the mechanical construction of the cooling chamber and control electronics, including the control algorithm. Next, the process of assembling the whole chamber is described. Part of the work is also the measurement of the achieved parameters of the chamber, first of all, the lowest achieved temperature, which was $-6.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, as well as the homogeneity of the temperature inside the chamber and the course of temperature regulation in the chamber. At the end of the work is also given an economic balance and an estimate of the price of the whole system.

Keywords: Peltier cell, thermoelectric phenomenon, cooling chamber, microcontroller, two-step controller

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	1
Fyzikální veličiny	1
Seznam zkratk	1
Chemické prvky	2
1 Úvod	3
2 Teoretický rozbor fyzikálních jevů a principů	5
2.1 Termoelektrické jevy	5
2.2 Využití termoelektrických jevů pro termoelektrické chlazení	7
2.2.1 Polovodiče a vlastní vodivost	7
2.2.2 Polovodiče typu P	8
2.2.3 Polovodiče typu N	8
2.2.4 Peltierův článek	9
2.2.5 Konstrukce Peltierových modulů	10
2.2.6 Důležité parametry Peltierových modulů	11
2.2.7 Použití Peltierových modulů	11
2.2.8 Výhody Peltierových modulů	11
3 Návrh systému s komorou	13
3.1 Návrh vnější struktury komory	14
3.2 Peltierovy články	15
3.3 Napájení komory	16
3.4 Odvod tepla z horké strany Peltierových článků	17
3.5 Řízení činnosti komory	17
3.5.1 Platforma Arduino Nano	18
3.5.2 Připojení pinů Arduina	19
3.5.3 Senzor teploty	19
3.5.4 Spínání Peltierových článků	20
3.5.5 Ovládací prvky komory	21
3.5.6 Regulace teploty a řídicí program	22
4 Konstrukce teplotní komory	25
4.1 Náčrt komory	25
4.2 Zhotovení dílů komory	25
4.3 Kompletace	30
4.4 Elektronika	31
5 Měření dosažených parametrů teplotní komory	33
5.1 Měření dosažení nejnižší teploty a homogenity	34
5.1.1 Měření bez míchání vzduchu uvnitř komory	34
5.1.2 Měření s mícháním vzduchu uvnitř komory	37
5.2 Měření regulace teploty	40
5.3 Zhodnocení dosažených výsledků	42
6 Ekonomická rozvaha	43
7 Závěr	45
Literatura	47
A Příklad mezních charakteristik Peltierova článku	51
B Podrobný popis všech vstupů a výstupů desky Arduino	53
C Kompletní obvodové schéma	55
D Výkres vnější struktury komory	57

Obrázky

2.1 Uzavřený obvod z různých kovů (kresleno dle[1])	6	4.6 Zadní strana S3	28
2.2 Princip Seebeckova jevu [4]	6	4.7 Přední strana S1	29
2.3 Princip Peltierova jevu [7]	7	4.8 Kryt ventilátorů H3	29
2.4 Zapojení Peltierova článku [12] . .	9	4.9 Panel H1	29
2.5 Nákres Peltierova modulu [7] . .	10	4.10 Víko H2	29
3.1 Blokové schéma tepotní komory	13	4.11 Sekce s ventilátory	30
3.2 Vizualizace chladicí komory	15	4.12 Detail uchycení chladiče	31
3.3 Spínaný zdroj MEAN WELL RSP-320-12	16	4.13 Pohled na chladiče zesponu . . .	31
3.4 DC-DC měnič typu step-down . .	16	4.14 Protikus pro montáž dílu H1 . .	31
3.5 Chladič Cooler Master Hyper 212 [20]	17	4.15 Protikus s připevněným dílem .	31
3.6 Arduino Nano[23]	18	4.16 Dokončený chlazený prostor komory	32
3.7 Teplotní senzor DS18B20 [26] . .	19	4.17 Osazený vrtaný spoj	32
3.8 Schéma připojení senzoru DS18B20 [27]	20	5.1 Nákres jednotlivých pozic teplotního senzoru	33
3.9 Schéma zapojení Peltierova článku a spínacího tranzistoru (převzato z [31]	21	5.2 Průběh teploty v závislosti na čase (bez míchání vzduchu)	34
3.10 Použitý LCD displej [32]	21	5.3 Průběh teploty v závislosti na čase (s mícháním vzduchu)	37
3.11 Základní zapojení sběrnice I2C [33]	22	5.4 Průběh regulace teploty v závislosti na čase	40
3.12 Připojení tlačítka i potenciometru k Arduino [34],[35]	23		
3.13 Vývojový diagram řídicího programu	23		
4.1 Nákres chladicí komory	25		
4.2 Díly vyříznuté z ABS desek	26		
4.3 Hotová přepážka P1	27		
4.4 Hotová přepážka P2	28		
4.5 Boční strana S4	28		

Tabulky

2.1 Popis parametrů Peltierových termobaterií[11]	11
3.1 Mezní parametry vybraných článků[17]	15
3.2 Přehled pinů využitých pro připojení externích modulů.....	19
3.3 Výpis údajů na LCD displej	22
4.1 Detailní popis všech dílů	26
5.1 Měření v pozici „Dole“	35
5.2 Měření v pozici „Uprostřed“ ...	36
5.3 Měření v pozici „Nahoře“	36
5.4 Měření v pozici „Dole“ s mícháním vzduchu	38
5.5 Měření v pozici „Uprostřed“ s mícháním vzduchu	38
5.6 Měření v pozici „Nahoře“ s mícháním vzduchu	39
5.7 Měření průběhu regulace teploty	41
6.1 Ekonomická rozvaha - Konstrukční a jiné materiály.....	44
6.2 Ekonomická rozvaha - Elektronické součástky	44

Seznam zkratek a symbolů

Fyzikální veličiny

Symbol	Jednotka	Význam
A	eV	Výstupní práce
φ_K	V	Velikost potenciálové bariéry
φ	V	Elektrický potenciál
U	V	Elektrické napětí
I	A	Elektrický proud
R	Ω	Elektrický odpor
T	$^{\circ}\text{C}$	Teplota
α	$\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$	Seebeckův koeficient
λ	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
SD	Secure Digital
CNC	Computer Numerical Control
IDE	Integrated Development Environment
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
LCD	Liquid Crystal Display


 **Chemické prvky**

Značka	Název
Al	Hliník
Zn	Zinek
Sn	Cín
Pb	Olovo
Sb	Antimon
Bi	Vismut
Hg	Rtuť
Fe	Železo
Cu	Měď
Ag	Stříbro
Au	Zlato
Pt	Platina
Pd	Palladium
C	Uhlík
Si	Křemík
Ge	Germanium



Kapitola 1

Úvod

Přestože byly termoelektrické jevy objeveny a popsány již v devatenáctém století, reálné praktické využití našly až v poměrně nedávné době. S rozvojem elektrotechniky a výrobou nových materiálů postupně tyto jevy našly nezastupitelné místo v aplikacích jako je měření teploty, termoelektrické chlazení nebo výroba elektrické energie.

Do této skupiny patří také Peltierův jev, který je využit v zařízení jménem Peltierův článek, což je základní stavební blok této práce. Tématem práce je návrh a výroba modelu chladicí komory s Peltierovými články. Toto téma jsem si zvolil, neboť jsem si chtěl ověřit, zda budu schopen navrhnout, sestavit a otestovat celý systém chladicí komory.

V práci budou popsány základní fyzikální jevy týkající se termoelektrických jevů a jejich využití pro chlazení. Dále bude proveden návrh samotné komory včetně řídicí elektroniky a bude popsán proces jejího sestavení v neposlední řadě budou také zjištěny dosažené parametry dokončené komory a bude uvedena ekonomická rozvaha s jednoduchým odhadem ceny.

Kapitola 2

Teoretický rozbor fyzikálních jevů a principů

2.1 Termoelektrické jevy

V kovech je vedení elektrického proudu zajištěno uspořádaným pohybem volných elektronů. Volné elektrony se mohou volně pohybovat uvnitř kovů, ale nemohou je samovolně opustit. U povrchu kovů totiž na volné elektrony působí přitažlivá Coulombova síla, která tyto elektrony vtahuje zpět dovnitř kovu a vytváří potenciálovou bariéru, kterou elektrony nejsou schopny samovolně překonat [1],[2].

K překonání potenciálové bariéry je potřeba dodat určité množství energie, tuto energii nazýváme výstupní práce. Pokud označíme velikost potenciálové bariéry jako φ_K (V) a náboj elektronu jako e (C), bude výstupní práce označená jako A (eV) určena vztahem [1],[2]

$$A = \varphi_K \cdot e. \quad (2.1)$$

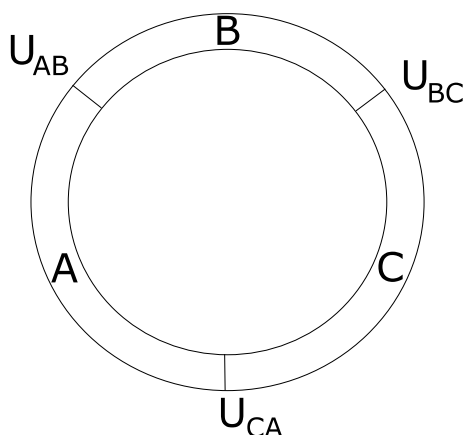
Pokud dojde ke spojení různých kovů vznikne mezi těmito kovy rozdíl potenciálů. Po spojení obou kovů začnou elektrony přecházet směrem do kovu, který má vyšší výstupní práci [1]. Kovy se tedy začnou opačně nabíjet a na spoji těchto kovů vznikne kontaktní potenciál – kontaktní napětí [2].

Tento jev objevil roku 1795 italský fyzik Alessandro Volta a uspořádal kovy do následující řady: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. Pokud bychom spojili některý kov z této řady s jakýmkoliv kovem, který ho v řadě následuje, nabíjel by se kladně [3].

Takový jev není možné použít jako zdroj elektrického proudu, jelikož dojde k vzájemnému vyrušení všech kontaktních napětí [2]. Vezměme například v úvahu situaci, kdy spojíme tři odlišné kovy označené jako A, B a C s potenciály $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ (V), a kontaktními napětími U_{AB}, U_{BC} a U_{CA} (V) (Obrázek 2.1). Elektrický proud I (A) tekoucí obvodem by v tomto případě byl dán vztahem [2]

$$I = \frac{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}{R} = \frac{(\varphi_B - \varphi_C) + (\varphi_A - \varphi_B) + (\varphi_C - \varphi_A)}{R}, \quad (2.2)$$

kde R (Ω) je elektrický odpor.

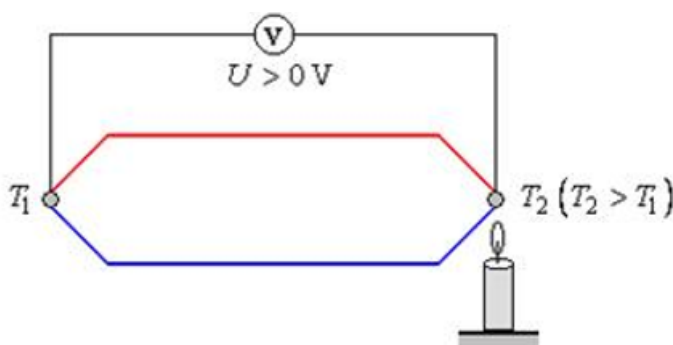


Obrázek 2.1: Uzavřený obvod z různých kovů (kresleno dle[1])

Výše uvedený vztah platí pouze pokud mají všechna místa, kde jsou kovy spojené, stejnou teplotu. Velikost kontaktního napětí je závislá na teplotě. Pokud bychom však umístili spoj kovů A a B do prostředí o teplotě T_1 a ostatní dva spoje by měly teplotu T_2 , byl by výsledný proud protékající obvodem nenulový a platil by pro něj vztah [2]

$$I = \frac{U_{CA}(T_1) + U_{AB}(T_2) + U_{BC}(T_1)}{R}, \quad (2.3)$$

kde T je teplota ($^{\circ}\text{C}$), I je elektrický proud (A), U je elektrické napětí (V) a R je elektrický odpor (Ω). Tento jev nazýváme Seebeckovým jevem podle jeho objevitele Thomase Johanna Seebecka, který ho poprvé pozoroval v roce 1821. Seebeckův jev nám říká, že pokud spojíme dva kovy a každý z těchto spojů budeme udržovat při jiné teplotě T , naměříme na výstupu tohoto obvodu termoelektrické napětí ΔU [4]. Princip Seebeckova jevu je ilustrován na Obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Princip Seebeckova jevu [4]

V souvislosti se Seebeckovým jevem se uvádí obecný vztah [5] pro termo-

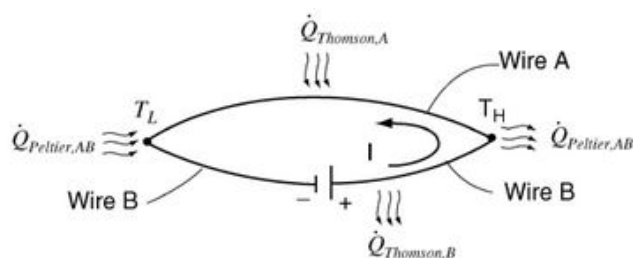
elektrické napětí ΔU (V) jako

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_1(T) - \alpha_2(T) dT. \quad (2.4)$$

Kde T_1 a T_2 jsou teploty spojů dvou kovů ($^{\circ}\text{C}$) a α_1 , α_2 jsou Seebeckovy koeficienty těchto kovů ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Hodnota Seebeckova koeficientu je závislá na materiálu a zjišťuje se měřením [2]. Seebeckův koeficient je také obecně závislý na teplotě [5]. Pokud je však rozdíl mezi teplotami spojů T_1 a T_2 malý, lze závislost napětí ΔU na teplotě považovat za lineární, přičemž pro něj bude platit zjednodušený vztah [4]

$$\Delta U = \alpha_{12}(T_2 - T_1). \quad (2.5)$$

Opačným jevem k Seebeckovu jevu je Peltierův jev, objevený francouzským fyzikem Jeanem Charlesem Peltierem. Peltierův jev spočívá v tom, že pokud spojíme dva různé kovy a připojíme je na zdroj stejnosměrného napětí, bude se místo styku obou kovů ohřívat nebo ochlazovat v závislosti na směru průtoku elektrického proudu [6]. Pokud proud poteče směrem z kovu s nižším potenciálem do kovu s vyšším potenciálem, bude se spoj ohřívat, pokud bude směr toku proudu opačný spoj se bude naopak ochlazovat [1]. Princip Peltierova jevu je ilustrován na Obrázku 2.3.



Obrázek 2.3: Princip Peltierova jevu [7]

2.2 Využití termoelektrických jevů pro termoelektrické chlazení

2.2.1 Polovodiče a vlastní vodivost

Elektrony v atomu nabývají pouze konkrétních diskretních hodnot energií, tzv. energetických hladin. Počet těchto hladin je v reálných případech velmi vysoký, jelikož jsou však tyto hladiny velmi blízko, lze je seskupit do pásů hodnot energií, kterých mohou elektrony nabývat, tyto dovolené pásy jsou odděleny zakázaným pásem. Pro elektrickou vodivost je podstatné, jakým způsobem elektrony zaplňují nejvyšší pásy hodnot energií, jedná se o valenční a vodivostní pásy oddělené oblastí zvanou zakázaný pás. Pokud bude šířka zakázaného pásu taková, že ho elektrony budou moci při dodání tepelné

energie překonat a přeskočit z valenčního pásu do vodivostního, bude se jednat o látku, která se bude při nízké teplotě jevit jako nevodivá, ovšem při vyšší teplotě se její vodivost několikanásobně zvýší. Látkám, které mají tyto vlastnosti říkáme polovodiče [8]. Základní polovodivé materiály jsou prvky IV. skupiny periodické soustavy prvků (C, Si, Ge, Sn, Pb), které mají ve valenčním pásu 4 elektrony [9].

Volné elektrony uvolněné dodáním energie budou obsazovat vodivostní pás a budou přispívat k elektrické vodivosti [8]. Ve valenčním pásu po těchto uvolněných elektronech zbudou prázdná místa, která se díky chybějícímu zápornému náboji jeví jako kladně nabitá, tato místa se nazývají díry. Stejně tak jako elektrony jsou volné také díry, a též přispívají k elektrické vodivosti, rozeznáváme proto vodivost děrovou a elektronovou [8].

Vlastní koncentrace elektronů a děr je konstantní při dané teplotě. To bývá způsobeno tím, že elektrony vzniknuvší dodáním energie se mohou setkat s dírou a obsadit tato kladně nabitá místa, dojde k samovolnému zániku páru elektron – díra. Popsanému jevu říkáme rekombinace [8]. Často je však potřeba vytvořit polovodič s určitou koncentrací nosičů náboje (elektronů a děr) v poměrně širokém teplotním rozsahu, odpovídající konkrétním požadavkům například pro konstrukci polovodičových součástí. Toho můžeme docílit dotováním vlastního polovodiče příměsemi o vhodných vlastnostech. V závislosti na příměsi může dotací vzniknout buď polovodič typu P, nebo typu N [8].

■ 2.2.2 Polovodiče typu P

V případě, že dotujeme vlastní polovodič se čtyřmi valenčními elektrony prvkem, který má pouze tři valenční elektrony (pochází ze III. skupiny periodické soustavy prvků), bude atom tohoto prvku pevně vázán jen třemi kovalentními vazbami, čtvrtá vazba bude volná a na své místo může přitáhnout elektron z jiné kovalentní vazby, vznikne tak kladně nabitě volné místo - díra, jež se může volně pohybovat. Atom, který přijme elektron nazýváme akceptorem. Pokud dotací zvýšíme počet děr oproti počtu elektronů, stanou se díry s kladným nábojem majoritními nosiči náboje a dostaneme polovodič typu P [8].

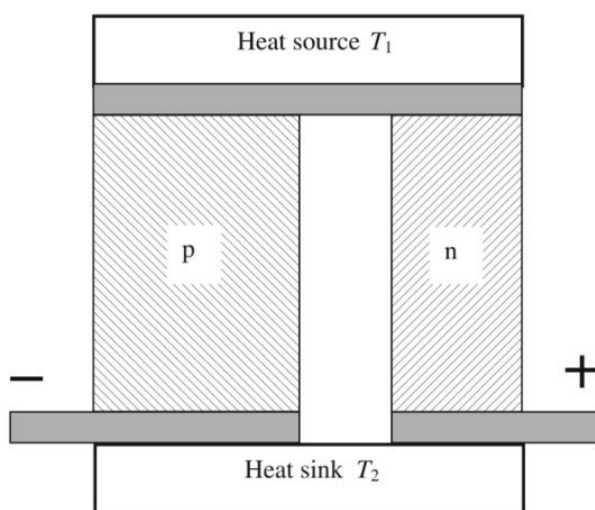
■ 2.2.3 Polovodiče typu N

Polovodič typu N získáme dotací vlastního polovodiče (například křemíku) se čtyřmi valenčními elektrony prvkem, který má pět valenčních elektronů (například fosforu z V. skupiny periodické soustavy prvků). Čtyři elektrony tohoto prvku se pevně sváží kovalentní vazbou s okolními atomy, pátý valenční elektron však nebude pevně vázán k žádnému atomu a k uvolnění tohoto elektronu je potřeba výrazně méně energie, než pokud by se jednalo o vlastní polovodič. Jedná se o dárce elektronu, proto se tento atom nazývá donor.

Stačí pouze malé množství donorů, aby došlo ke zvýšení koncentrace elektronů oproti dírám, elektrony, které mají záporný náboj se tedy stanou hlavními (majoritními) nosiči náboje. [8].

2.2.4 Peltierův článek

Jak už název napovídá, Peltierův článek pro svou činnost využívá Peltierova jevu, kdy se při průchodu elektrického proudu jedna strana článku absorbuje a druhá vyzařuje teplo. Základní schéma zapojení Peltierova článku je na Obrázku 2.4, kde T_1 je teplá strana a T_2 studená strana článku, P a N jsou tělíska vyrobená z polovodičových materiálů typu P a typu N.



Obrázek 2.4: Zapojení Peltierova článku [12]

Po připojení ke zdroji stejnosměrného napětí dojde vlivem proudu protékajícího obvodem k přemístování volných nosičů náboje. V polovodiči typu N budou majoritní nositelé náboje (elektrony) přitahovány ke kladnému pólu zdroje. Naopak v polovodiči typu P budou díry, které jsou zde majoritními nositeli náboje přitahovány ke kladnému pólu zdroje. To způsobí nerovnováhu elektronů na spojení obou polovodičů, což povede k nárůstu termoelektrického napětí, jenž je úměrné rozdílu teplot spojů na studené a teplé straně, proto se s rostoucím termoelektrickým napětím bude zvyšovat i teplotní rozdíl [10], [6].

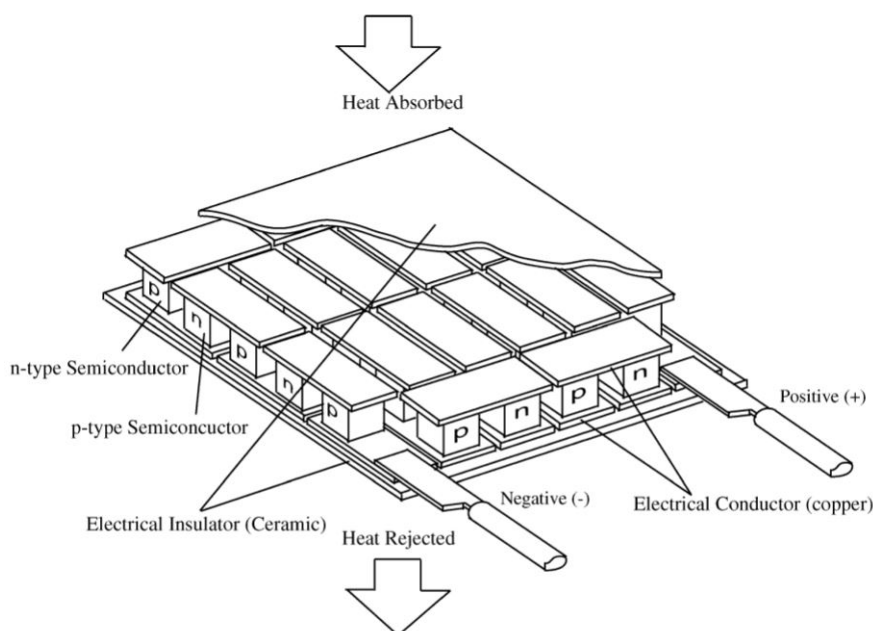
Ve spojovacím můstku dojde k poklesu volných nosičů náboje, tím poklesne i kontaktní napětí na spoji můstku a polovodiče a dojde na této straně k ochlazení, naproti tomu se bude opačná strana ohřívat [6].

2.2.5 Konstrukce Peltierových modulů

Nejpoužívanějšími materiály pro výrobu polovodičových tělísek Peltierových článků jsou vizmut-telluridy, konkrétně Bi-Te-Se pro polovodič typu N a Bi-Sb-Te pro polovodič typu P. Tyto materiály jsou využívány hlavně kvůli svým výhodným termoelektrickým vlastnostem (jmenovitě se jedná o malý součinitel tepelné vodivosti a malý měrný elektrický odpor). Kovy jsou pro výrobu tělísek nevhodné, zejména protože mají nízký Seebeckův koeficient [6].

Polovodičová tělíška jsou na jedné straně opatřena kontakty pro přívod elektrického proudu a na druhé straně jsou spojena propojovacím můstkem, nejčastěji z Cu, která má dobrou elektrickou vodivost a lze ji jednoduše pájet [6]. Pro co nejdelší životnost článku by měla být provozní teplota článku co možná nejnižší oproti teplotě tání použité pájky [11].

Jednotlivé články se spojují do série z hlediska vedení elektrického proudu a paralelně z hlediska vedení tepla. Články se uzavírají mezi dvě keramické destičky, nejčastěji vyrobené z oxidu hlinitého. Keramické destičky mají za úkol poskytnout elektrickou izolaci od vnějšího prostředí a zároveň mít dobrou tepelnou vodivost pro co nejlepší přenos tepla, jejich dalším úkolem je pak ochrana proti mechanickému poškození. Takto vzniklou sestavu nazýváme Peltierova termobaterie nebo Peltierův modul (Obrázek 2.5) [11].



Obrázek 2.5: Nákres Peltierova modulu [7]

■ 2.2.6 Důležité parametry Peltierových modulů

Peltierovy moduly jsou nejčastěji charakterizovány následujícími mezními parametry uvedenými v tabulce 2.1, které bývají běžně uváděny výrobcem v katalogovém listu [11].

Tabulka 2.1 : Popis parametrů Peltierových termobaterií[11]

Parametr	Popis
I_{MAX} [A]	Max. vstupní proud při ΔT_{MAX}
U_{MAX} [V]	Max. vstupní napětí při I_{MAX} při nulové tepelné zátěži
ΔT_{MAX} [°C]	Max. rozdíl teplot mezi studenou a teplou stranou při nulové tepelné zátěži
Q_{MAX} [W]	Max. tepelný výkon přenášený ze studené strany na teplou při $\Delta T_{MAX} = 0$

Tyto parametry jsou na sobě navzájem závislé, pro co nejlepší analýzu chování Peltierova článku je výhodné tyto parametry vyjádřit graficky. Příklad tohoto grafického vyjádření je v příloze A.

■ 2.2.7 Použití Peltierových modulů

Široké možnosti využití nalézají Peltierovy moduly hlavně v režimu termoelektrického chladiče. Používají se například v běžných aplikacích jako jsou malé cestovní chladičí boxy a ledničky nebo v malých klimatizačních jednotkách. Peltierovy moduly však také nalézají uplatnění v měřicí technice a v elektrotechnice, pro chlazení malých elektrických a optoelektrických zařízení [12].

Kromě použití Peltierových modulů pro chlazení je lze také využít jako generátory elektrické energie. V této oblasti lze očekávat rozšiřování možností použití díky vývoji nových vhodných materiálů. Nejvýraznější aplikace je v radioizotopových generátorech na kosmických sondách. Mimo kosmonautiky je pak například možné termoelektrické generátory použít k výrobě energie z odpadního tepla. [12].

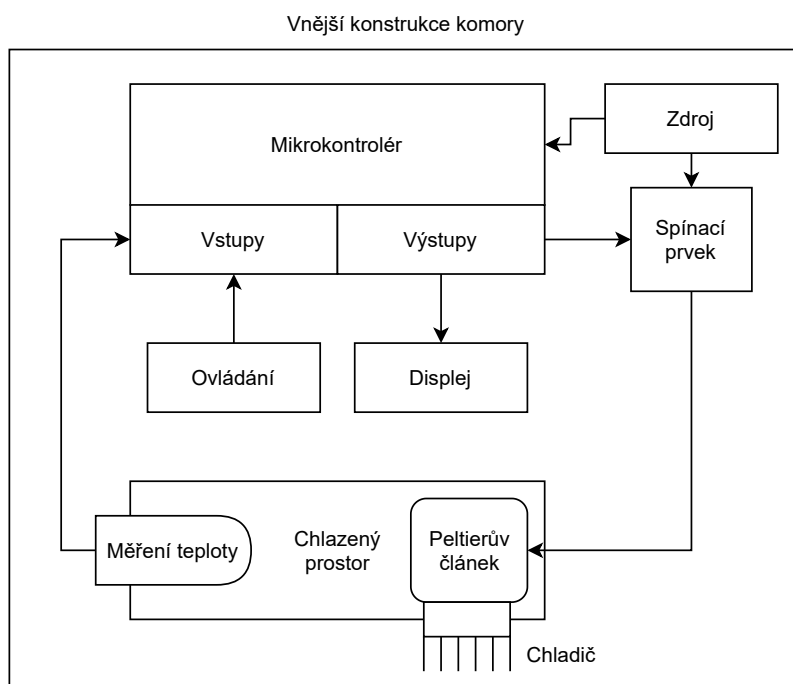
■ 2.2.8 Výhody Peltierových modulů

Mezi hlavní výhody Peltierových modulů se řadí jejich kompaktní rozměry, jsou tedy výhodné pro použití v aplikacích náročných na prostor. Peltierův modul také není náchylný ke změnám polohy v prostoru, může být snadno ovládán a pracovat nepřetržitě po dlouhé časové úseky. Modul je robustní, je spolehlivý hlavně díky absenci pohybujících se součástí, čímž je také zajištěn tichý provoz [12].

Kapitola 3

Návrh systému s komorou

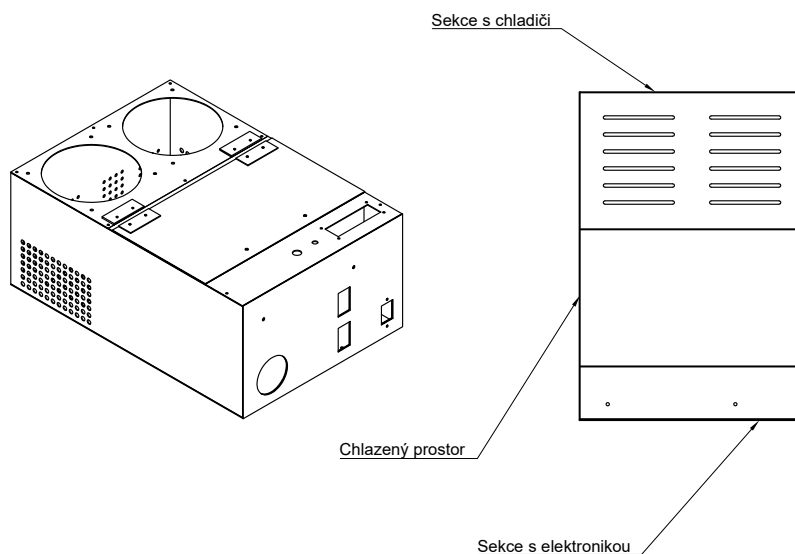
Při návrhu chladicí komory bylo potřeba vyřešit řadu dílčích problémů. V první řadě však bylo nutné brát v potaz požadavky dané zadáním a z těchto požadavků vycházet. Pro lepší vizualizaci rozboru návrhu je na Obrázku 3.1 uvedeno blokové schéma teplotní komory.



Obrázek 3.1: Blokové schéma teplotní komory

Objem chlazeného prostoru komory by měl být dle zadání alespoň 1 dm^3 , komora má být napájena stejnosměrným napětím 12 V a její příkon by měl být přibližně 200 W . Dalším požadavkem je zobrazování vnitřní teploty na displeji. K volitelným požadavkům patří výběr vhodného teplotního senzoru a mikrokontroléru. Dále pak bylo nutné vyřešit samotnou konstrukci komory a řízení Peltierových článků. Komora by dle zadání také měla být navržena

Poslední je sekce, kde jsou umístěny chladiče s ventilátory a samotnými Peltierovými články.



Obrázek 3.2: Vizualizace chladičí komory

Jako izolace chlazeného prostoru byl použit 30 mm silný extrudovaný polystyrén. Uvedený materiál má výborné tepelně izolační vlastnosti (typický součinitel tepelné vodivosti je $0,028-0,031 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [16]), je pevný, odolný proti vlhkosti a dobře se zpracovává. Konečný vnitřní objem chlazeného prostoru je 2 dm^3 . Přístup dovnitř chlazeného prostoru je umožněn odklápěcím víkem zavěšeným na dvou kovových pantech.

3.2 Peltierovy články

Pro chlazení komory jsem zvolil dva Peltierovy články typu TEC1-127080S o rozměrech 40x40 mm. Důležité mezní parametry jsou uvedeny v tabulce 3.1 Vybrané články poskytují dostatečný chladičí výkon a bez problémů zapadají do přibližné energetické bilance zdroje udané v zadání.

Tabulka 3.1 : Mezní parametry vybraných článků[17]

Parametr	Popis
I_{MAX} [A]	8,4
U_{MAX} [V]	16,4
ΔT_{MAX} [°C]	75
Q_{MAX} [W]	80

3.3 Napájení komory

Jako hlavní napájecí zdroj celé komory jsem původně zvolil modulární spínaný zdroj MEAN WELL SP-240-12 (12 V DC /20 A), ale z důvodu jeho nedostupnosti jsem nakonec vybral zdroj MEAN WELL RSP-320-12 (12 V DC/26,7 A) [18] (Obrázek 3.3). Výkon předmětného zdroje je 320 W, což také poskytuje prostor pro případné budoucí vylepšení komory (například osazení výkonnějšími články).



Obrázek 3.3: Spínaný zdroj MEAN WELL RSP-320-12

Zmíněný zdroj je kompletní plně funkční jednotka, která obsahuje vlastní zabudované aktivní chlazení a ochranami proti zkratu, přetížení, přepětí a přehřátí. Jedinou nutnou věcí je zapojení zdroje. Za tímto účelem disponuje zdroj svorkovnicí se třemi 12 V výstupy a dále svorkami pro připojení síťového kabelu (230 V). Pro připojení zdroje do sítě jsem kvůli praktičnosti zvolil počítačovou vidlici s odpojitelným síťovým kabelem, která bude napevno přišroubována ke stěně komory. Nebude zde tak hrozit vytržení kabelu ze stěny komory a případné odhalení živých vodičů.



Obrázek 3.4: DC-DC měnič typu step-down

Z výše popsaného zdroje budou napájeny oba Peltierovy články a ventilátory obou chladičů. Pro napájení řídicí elektroniky je však potřeba napětí 5 V. Bylo by možno napájet veškerou tuto elektroniku přes použitou desku (viz. 3.5.1), jelikož disponuje lineárním napěťovým regulátorem[23], při vstupním napětí o velikosti 12 V, by zde však mohlo hrozit riziko zbytečného přehřívání

a zkrácení životnosti, či zničení regulátoru. Z tohoto důvodu bude veškerá řídicí elektronika napájena přes DC-DC měnič typu step-down[19] (Obrázek 3.4), jehož výstupní napětí lze nastavit na požadovanou hodnotu zabudovaným trimrem.

3.4 Odvod tepla z horké strany Peltierových článků

K dosažení co nejnižší teploty v komoře bylo nutné najít optimální aktivní chlazení pro co nejrychlejší odvod tepla z horké strany Peltierova článku. K tomuto účelu dobře posloužily běžně prodávané chladiče určené pro chlazení procesorů ve stolních počítačích. Toto řešení je použito například v [14] a [13]. Každý ze dvou Peltierových článků má svůj vlastní chladič s ventilátorem. Kritériem pro výběr byla hlavně dostatečná velikost pro co nejlepší odvod tepla a velikost styčné plochy chladiče, která odpovídá velikosti Peltierova článku. Pro chlazení jsem vybral chladič Cooler Master Hyper 212 (Obrázek 3.5). Těleso chladiče obsahuje čtyři tzv. heatpipes, což jsou utěsněné duté trubičky naplněné médiem (kapalinou), které odpařováním a následnou kondenzací média uvnitř dokáží efektivně odvádět teplo ze styčné plochy chladiče [21]. Chladič je dále osazen 120 mm ventilátorem pro aktivní odvod tepla z tělesa chladiče.



Obrázek 3.5: Chladič Cooler Master Hyper 212 [20]

3.5 Řízení činnosti komory

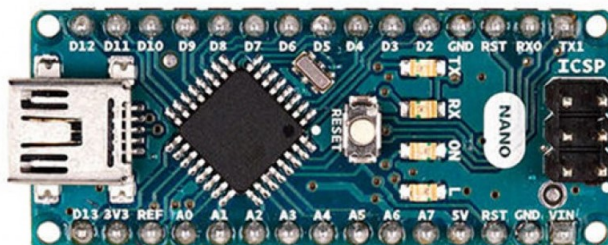
Pro řízení činnosti komory bude využit mikrokontrolér. Jedná se o polovodičovou součástku, na které jsou integrovány kromě vlastního mikroprocesoru také paměť, která bývá rozdělena na paměť programu a paměť dat. Dále pak

na čipu mohou být integrovány další periferie jako jsou A/D a D/A převodníky, vstupně-výstupní obvody, časovače a komunikační rozhraní. Mikrokontroléry jsou ideální pro použití v aplikacích, kde je třeba řídit a kontrolovat různé procesy [22].

■ 3.5.1 Platforma Arduino Nano

Zvolenou platformou je deska Arduino Nano (Obrázek 3.6). Deska je postavena na čipu ATmega328 od společnosti Atmel. Níže jsou uvedeny hlavní parametry desky [23].

- Operační napětí: 5 V
- Vstupní napětí (doporučené): 7-12 V
- Takt: 16 MHz
- Počet digitálních I/O pinů: 22 (z toho 6 poskytuje PWM výstup)
- Počet analogových vstupních pinů: 8
- Velikost FLASH paměti (programová paměť): 32 KB
- Velikost SRAM (paměť proměnných): 2 KB
- Velikost EEPROM: 1 KB



Obrázek 3.6: Arduino Nano[23]

Jedná se o velmi rozšířenou open-source platformu. Pro Arduino existuje velké množství rozšiřujících modulů (od slotu na SD karty až po ovládací moduly pro CNC) s volně stáhnutelnými knihovnamí, které zajišťují jednoduché ovládání i poměrně komplexních systémů. Současně je také mnoho volně dostupných návodů a vzorových kódů pro ovládání různých periférií, které se dají snadno modifikovat, pro použití v konkrétní aplikaci [24]. Další výhodou této desky spočívá v její malé velikosti. Dá se tedy pohodlně připojit do nepájivého pole, či uzavřít do pouzdra finálního produktu. Kromě výše uvedeného k této volbě přispěl i fakt, že mám již s touto platformou určité zkušenosti.

Pro napsání řídicího programu, který byl následně nahrán do Arduina jsem využil vývojové prostředí Arduino IDE. Toto prostředí obsahuje kromě samotného editoru pro psaní kódu i nástroje nutné pro oživení a nastavení desky a pro komunikaci s deskou [25].

■ 3.5.2 Připojení pinů Arduina

Podrobný popis všech vstupů a výstupů desky Arduino Nano je uveden v příloze B. V tabulce 3.2 je přehled pinů využitých pro připojení externích modulů, jejichž podrobný popis je uveden v částech 3.5.3 až 3.5.5. Kompletní obvodové schéma je pak v příloze C.

Tabulka 3.2 : Přehled pinů využitých pro připojení externích modulů

<i>Pin</i>	Připojený modul
A4, A5	LCD displej
A1	Potenciometr
D8	Senzor DS18B20
D2	Tlačítko
D9	Spínací tranzistor T1
D6	Spínací tranzistor T2

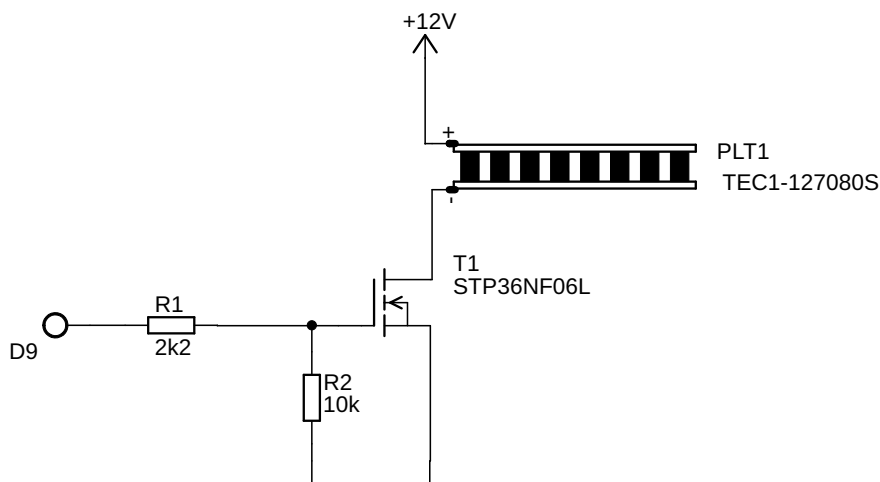
■ 3.5.3 Senzor teploty

Pro snímání teploty uvnitř komory jsem použil digitální teplotní senzor DS18B20 (Obrázek 3.7) od společnosti Dallas Semiconductor [27]. Senzor lze napájet napětím 3 - 5,5 V, dokáže měřit teplotu v rozsahu -55 °C - 125 °C s přesností $\pm 0,5$ °C. Senzor má nastavitelné rozlišení převodu teploty 9-12 bitů, což odpovídá teplotním přírůstkům o 0,5 °C - 0,625 °C (jako výchozí rozlišení je nastaveno 12 bitů). Senzor je kalibrován ve stupních celsia, výstupní hodnotu ze senzoru již tedy není nutné nijak dále převádět [27].



Obrázek 3.7: Teplotní senzor DS18B20 [26]

sepnutí tranzistoru[31].



Obrázek 3.9: Schéma zapojení Peltierova článku a spínacího tranzistoru (převzato z [31])

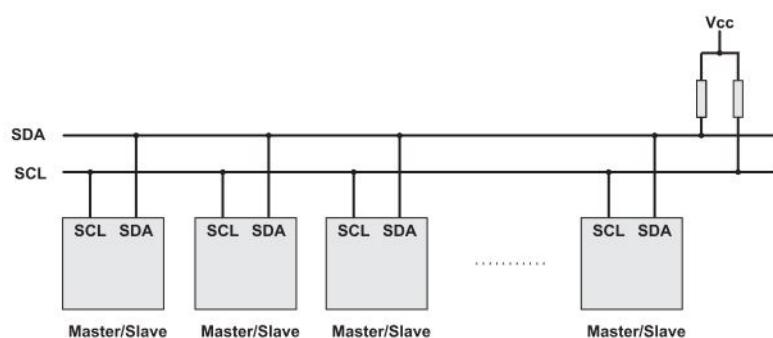
■ 3.5.5 Ovládací prvky komory

Pro zobrazení důležitých údajů o chodu chladicí komory jsem zvolil běžně používaný LCD displej o velikosti 16x2 znaky [32] (Obrázek 3.10).



Obrázek 3.10: Použitý LCD displej [32]

Konkrétní pořízený displej je vybaven převodníkem pro sběrnici I2C postaveném na obvodu PCF8574T. Pro komunikaci mikrokontroléru s displejem po této sběrnici jsou tedy kromě dvojice napájecích vodičů potřeba pouze dva vodiče a to datový vodič SDA a vodič s hodinovým signálem SCL. Jedná se o sběrnici typu multimaster, lze na ni tedy připojit i více řídicích obvodů (v tomto případě však bude připojen pouze jediný). Délka vodičů této sběrnice je dána jejich maximální přípustnou kapacitou 400 pF. Každé připojené zařízení má svou identifikační adresu (7 nebo 10 bitů)[33]. Základní zapojení sběrnice je na Obrázku 3.11. Připojení displeje je zobrazeno ve schématu v příloze C.



Obrázek 3.11: Základní zapojení sběrnice I2C [33]

Na displeji se po zapnutí komory nejprve zobrazí dotaz na požadovanou teplotu společně s nastavovanou hodnotou. Po zahájení činnosti komory se na prvním řádku displeje zobrazí nastavená hodnota teploty a na druhém aktuální hodnota teploty. Podoba tohoto výpisu je v tabulce 3.3.

Tabulka 3.3 : Výpis údajů na LCD displej

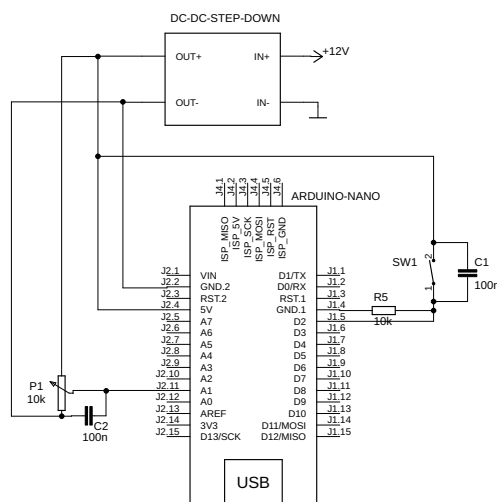
Řádek	Zobrazená informace
1.	Req.temp= <i>teplota</i> °C
2.	Act.temp= <i>teplota</i> °C

Komoru bude možné ovládat s pomocí lineárního otočného 10 k Ω potenciometru P1, kterým bude možné zvolit požadovanou teplotu z daného rozsahu (tento rozsah bude určen na základě hodnot získaných při měření na hotové komoře) a tlačítkového spínače SW1, kterým se zvolená teplota potvrdí a komora zahájí činnost. Připojení tlačítka a potenciometru k Arduino je znázorněno na Obrázku 3.12.

K tlačítku je paralelně zapojen 100 nF kondenzátor C1. Tento kondenzátor slouží jako prevence proti zákmitům tlačítka[36], ke kterým při jeho stisknutí nevyhnutelně dochází. Dále je v obvodu zapojen kondenzátor C2 (též o kapacitě 100 nF) mezi jezdcem a zemním pinem potenciometru P1. Tento kondenzátor jsem do obvodu dodatečně zapojil z důvodu poměrně častého přeskokování hodnoty čtené z potenciometru (zaznamenaná hodnota se většinou lišila nejvíce o ± 1 oproti nastavené, po připojení kondenzátoru již k tomuto jevu dále nedocházelo).

3.5.6 Regulace teploty a řídicí program

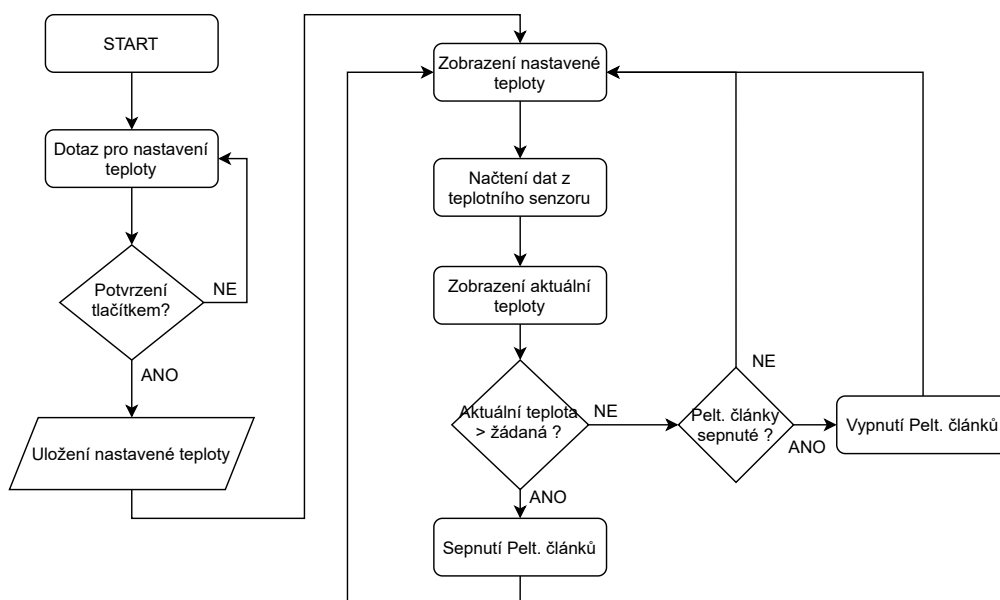
Pro kontrolu teploty uvnitř komory je použita dvoustavová regulace, kdy mikrokontrolér na základě porovnání regulované veličiny ze senzoru s požadovanou hodnotou spíná nebo vypíná akční člen (v tomto případě Peltierovy články). Při tomto způsobu řízení nejsou přítomny žádné mezistavy, akční



Obrázek 3.12: Připojení tlačítka i potenciometru k Arduinu [34],[35]

člen je buď ve stavu plného sepnutí nebo vypnutí v závislosti na odchylce aktuální od požadované hodnoty [37].

Na Obrázku 3.13 je vývojový diagram řídicího programu. Uživatel je nejprve vyzván k zadání teploty otočným potenciometrem. Natočením potenciometru se mění i napětí v rozsahu 0-5 V, které je přivedeno na analogový vstup Arduina a následně čteno. Na hodnoty napětí je namapován rozsah teplot, které je možné nastavit. Hodnoty teploty nastavené potenciometrem se průběžně zobrazují na displeji.



Obrázek 3.13: Vývojový diagram řídicího programu

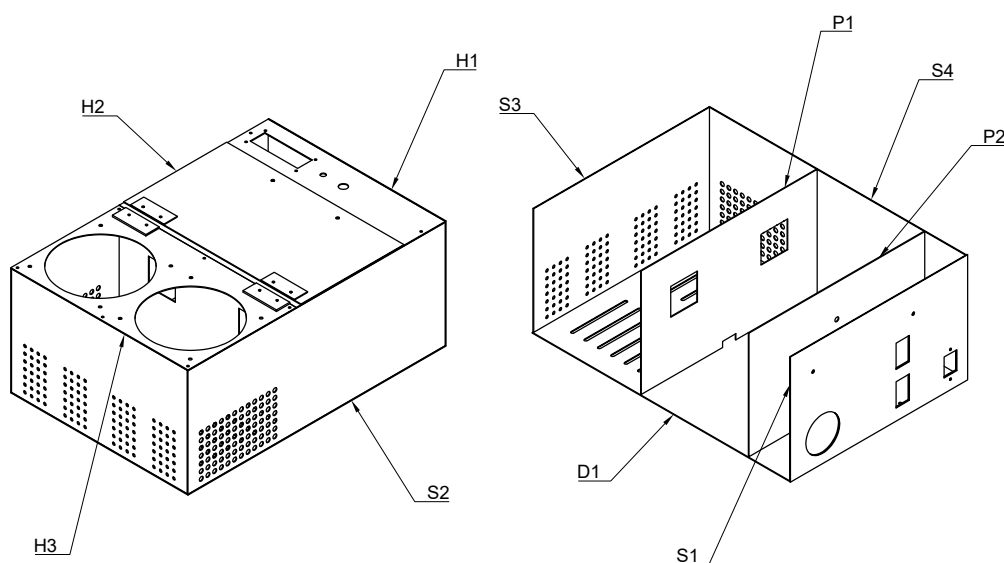
Po potvrzení stiskem tlačítka se vybraná hodnota uloží a komora započne činnost. Nejprve dojde k vyžádání a načtení teploty z teplotního senzoru, aktuální teplota je pak vedle požadované teploty zobrazena na displeji. Dále dojde k porovnání aktuální teploty v komoře s požadovanou teplotou, pokud je aktuální teplota vyšší, sepnou se Peltierovy články a teplota začne klesat. Program se poté vrátí zpět na začátek řídicí smyčky. Pokud je aktuální teplota nižší než požadovaná a články jsou sepnuté, dojde nejprve k jejich vypnutí a následnému návratu zpět na začátek řídicí smyčky.

Kapitola 4

Konstrukce teplotní komory

4.1 Nákres komory

Podrobný výkres chladicí komory je uveden v příloze D. Pro lepší orientaci v následujícím postupu stavby je na obrázku 4.1 uveden nákres komory s očíslovanými díly. V tabulce 4.1 je pak uveden bližší popis všech dílů.



Obrázek 4.1: Nákres chladicí komory

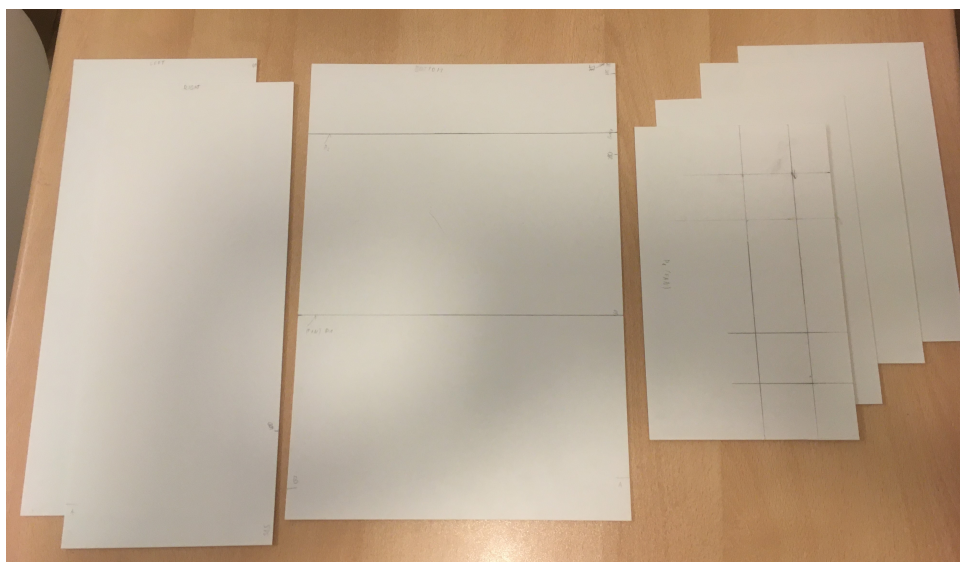
4.2 Zhotovení dílů komory

Stavbu jsem započal vyřezáním hlavních dílů komory z plastových ABS desek o síle 1 mm. Každý díl jsem nejprve nakreslil na desku a poté vyřízl. Na závěr

Tabulka 4.1 : Detailní popis všech dílů

Číslo dílu	Popis
H1	Panel s displejem a ovládacími prvky
H2	Otevíratelné víko komory
H3	Kryt ventilátorů
S1	Čelní strana
S2	Pravá boční strana
S3	Zadní strana
S4	Levá boční strana
D1	Dno komory
P1	Nosná přepážka chladičů
P2	Přepážka oddělující sekci s elektronikou

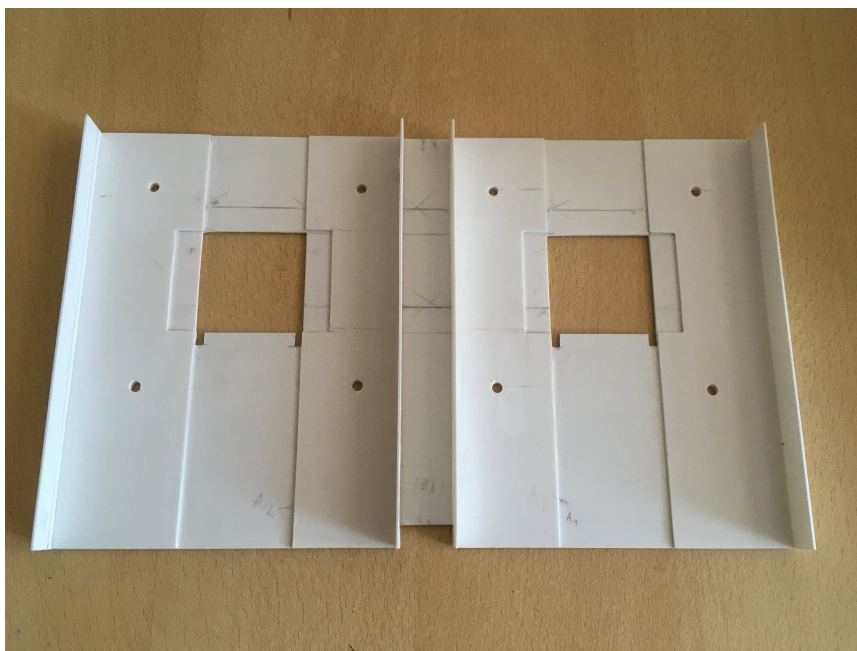
jsem ostré hrany všech dílů zahladil brusným papírem o zrnitosti 400. Hotové vyřezané díly jsou na Obrázku 4.2.

**Obrázek 4.2:** Díly vyříznuté z ABS desek

Následně jsem započal s dalším zpracováním jednotlivých dílů. Jako první přišla na řadu přepážka P1, které jsem věnoval zvláštní pozornost, jelikož se jedná o hlavní nosný prvek, k němuž budou přišroubovány oba chladiče s ventilátory.

Vyznačil jsem a poté vyřízl otvory o velikosti 40x40 mm pro Peltierovy články. Ve spodní části obou otvorů jsou ještě výřezy o rozměrech 4x5 mm pro vodiče vedoucí z obou článků. Ve spodní části přepážky je pak obdélníkový otvor o velikosti 20x8 mm, jímž vedou vodiče od článků a ventilátorů do přední sekce komory, kde je umístěn zdroj a řídicí elektronika. Přepážku bylo potřeba vyztužit. Vyřízl jsem proto z plastové desky čtyři proužky, které jsem následně

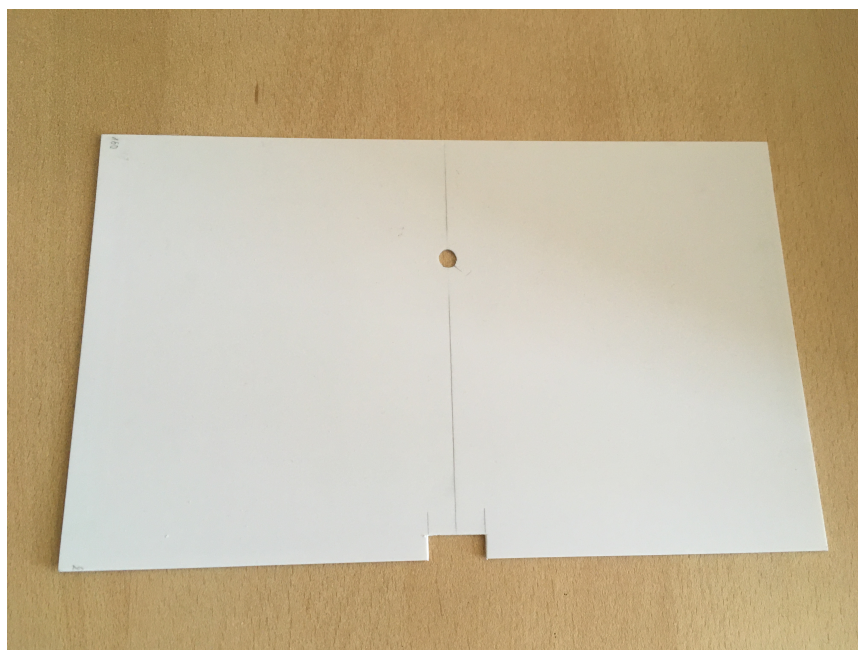
přilepil gelovým lepidlem určeným pro lepení plastů, a to svisle tak, aby lícovaly s okraji otvorů pro články. Přepážku jsem zatížil, aby nedošlo k jejímu zkroucení. Z opačné strany přepážky jsem přilepil horizontálně dva proužky o šířce 20 mm lícující s horním a dolním okrajem otvorů pro články. Dalším zpevňujícím prvkem jsou svislá žebra o velikosti 15x160 mm přilepená na okrajích a vprostřed přepážky. Posledním krokem bylo vyznačení a vyvrtání otvorů pro připevnění obou chladičů s ventilátory. Na obrázku 4.3 je dokončená přepážka P1.



Obrázek 4.3: Hotová přepážka P1

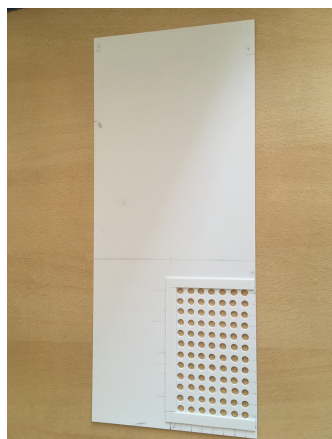
Sestavení přepážky P2, která odděluje chlazenou izolovanou sekci od sekce s elektronikou, bylo konstrukčně jednodušší. První modifikací byl obdélníkový otvor 20x8 mm pro protažení vodičů umístěný (stejně jako v případě nosné přepážky) uprostřed spodní části. Druhou a zároveň poslední modifikací této přepážky bylo vyvrtání otvoru o průměru 6 mm ve středu přepážky, a to 48 mm od horního okraje.

Následovala práce na dílech S2, S4 a D1. Na uvedených dílech bylo potřeba vytvořit perforace, aby mohl z vnitřku komory odcházet ohřátý vzduch od chladičů. Na pravé boční straně S2 jsem vyvrtal postupně 84 pravidelně rozmístěných otvorů o průměru 6 mm ve vzoru 12x7, otvory jsou od sebe vzdáleny 10 mm. Vzdálenost otvorů od spodní hrany je 10 mm a od boční hrany 20 mm. Pro dodatečné zpevnění jsem po obvodu hotových perforací přilepil 10 mm široké plastové proužky, jak lze vidět na Obrázku 4.5. Druhá boční stěna je identická, pouze zrcadlově otočená, postup zhotovení byl tedy stejný. Dno D1 bylo opatřeno perforací v podobě podlouhlých 84 mm dlouhých výřezů. V oblasti upevnění napájecího zdroje jsem pro dodatečné zpevnění nalepil plastovou destičku.

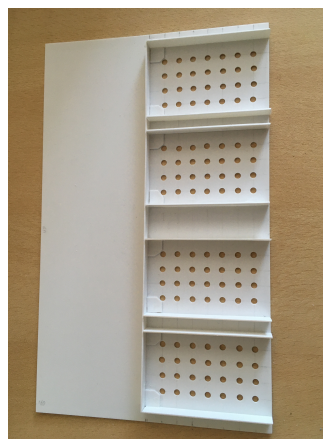


Obrázek 4.4: Hotová přepážka P2

Podobně jako boční stěny je i zadní strana S3 opatřena perforacemi pro snadné proudění ohřátého vzduchu. Zde jsem však vyvrtal otvory pouze o průměru 4 mm, rozdělené do čtyř skupin, z nichž každá čítá celkem 28 otvorů v obdélníkovém vzoru 4x7 s rozestupy 10 mm. Z vnitřní strany je k zadní stěně přilepena konstrukce z 10 mm širokých plastových pásků, která je patrná na Obrázku 4.6.



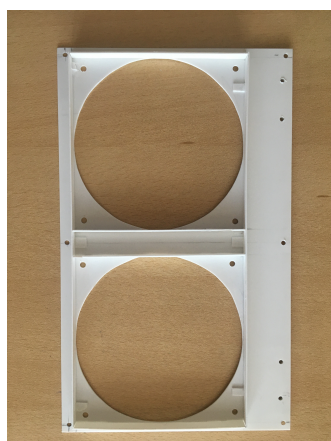
Obrázek 4.5: Boční strana S4



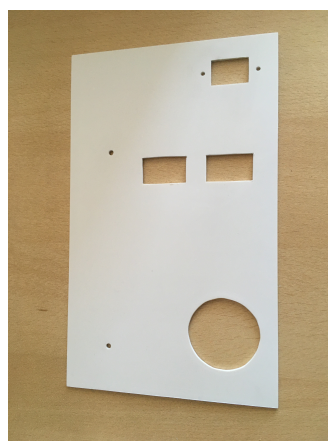
Obrázek 4.6: Zadní strana S3

Přední stěnu S1 jsem na rozdíl od ostatních zhotovil ze dvou plastových desek přilepených na sebe. Toto zpevnění bylo nutné, neboť k dané stěně je připevněn hlavní napájecí zdroj celé komory. Dále jsem vyřezal kruhový otvor a dva obdélníkové otvory v místě, kde jsou průduchy napájecího zdroje (Obrázek 4.7).

Poslední skupinou byly díly pro vrchní část komory, které na rozdíl od všech ostatních nejsou pevně přilepeny, ale jsou upevněny pomocí šroubů, aby byl zajištěn bezproblémový přístup k důležitým částem uvnitř komory. Ve všech těchto dílech byly navrtány otvory pro montáž. V dílu H3 jsem navíc vyřízl otvory o průměru 118 mm, kudy je nasáván vzduch. Nad tyto otvory jsem připevnil ochranné mřížky ventilátorů. Přepážku jsem zpevnil vnitřním žebrováním a nakonec jsem přilepil 2 mm silné podložky s otvory, určenými k přišroubování pantů (Obrázek 4.8).



Obrázek 4.7: Přední strana S1



Obrázek 4.8: Kryt ventilátorů H3

Nakonec jsem zhotovil víko H2 pro přístup k vnitřku komory a panelu H1. U krytu sekce s elektronikou bylo pouze nutné vyříznout otvory pro připevnění displeje a ovládacích prvků komory, tj. tlačítka, potenciometru (Obrázek 4.9). Dvířka komory jsou zhotovena ze 2mm silné desky se 7mm výřezem pro panty. Dvířka jsou zobrazena na Obrázku 4.10 s již připevněnými panty a rukojetí.



Obrázek 4.9: Panel H1



Obrázek 4.10: Víko H2

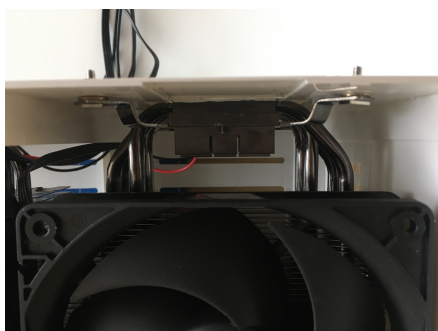
4.3 Kompletace

Když jsem měl připravené veškeré díly, přistoupil jsem k finálnímu sestavení komory. Nejprve jsem slepil dno D1 a levou boční stěnu S2. Při lepení těchto velkých dílů bylo potřeba postupovat pečlivě, jelikož díly k sobě musí být navzájem kolmé. V daném případě jsem nejprve oba díly slícovál k sobě a bodově přilepil vteřinovým lepidlem, pro udržení správné geometrie jsem použil dřevěný hranol a kovové úhelníky. Po vytvrzení vteřinového lepidla jsem ještě celý spoj zalil běžným lepidlem na lepení plastů. Výsledkem byl pevný a přesný lepený spoj. Dále jsem přilepil na svá místa vnitřní přepážky P1, P2 a zadní stěnu komory S3. Pro dodatečné zpevnění jsem do sekce s ventilátory doplnil výztuhu v podobě dvou žeber spojujících zadní stěnu a vnitřní přepážku a plastových pásek zalepených po obvodu, jak je patrné z Obrázku 4.11.

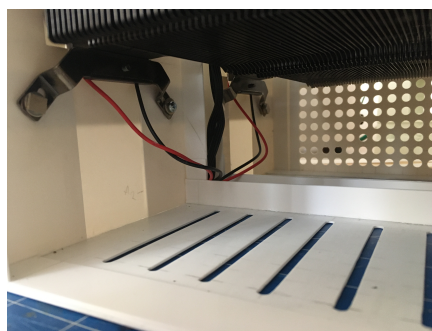


Obrázek 4.11: Sekce s ventilátory

Pozornost jsem rovněž věnoval samotným chladičům s ventilátory. Každý ze dvou chladičů je připevněn k přepážce držáky běžně používanými pro připevnění chladiče k základní desce počítače. Před samotnou montáží jsem na styčnou plochu obou chladičů nanasl teplovodivou pastu pro zajištění co nejlepšího přenosu tepla a následně jsem na ně připojil Peltierovy články. Celou sestavu jsem upevnil k přepážce šrouby. Detail připevnění chladiče je na Obrázku 4.12. Na Obrázku 4.13 je pak spodní pohled na připevněné chladiče. Vodiče pro napájení Peltierových článků i ventilátorů byly protaženy již připravenými otvory do sekce s elektronikou.



Obrázek 4.12: Detail uchycení chladiče



Obrázek 4.13: Pohled na chladiče zespodu

Po namontování chladičů jsem připojil i druhou boční stranu S4. Přední stranu S1 jsem přilepil jako poslední z důvodu usnadnění přístupu do sekce s elektronikou při testování komory. V místě spojení dílů H1 a H3 s komorou byl zalepen 10 mm široký rám, s otvory v místě montáže. Samotné spojení je realizováno pomocí šroubů. Nebylo možné použít šrouby přímo do plastu, jelikož by velmi brzy došlo k opotřebování takového spoje. Proto jsem zhotovil pro každý šroub protikus v podobě plastového lože se zalepenou matkou. Zhotovený protikus je vidět na Obrázku 4.14, na Obrázku 4.15 je pak stejný protikus s již připevněným dílem H1.



Obrázek 4.14: Protikus pro montáž dílu H1



Obrázek 4.15: Protikus s připevněným dílem

Nakonec jsem provedl izolaci chlazeného prostoru 30 mm silnými deskami z extrudovaného polystyrenu. Do desek jsem vyřízl otvory pro teplotní senzor a oba Peltierovy články. Pro lepší přenos tepla jsem připevnil k článkům teplovodivou pastou průchodky z mědi s rozměry odpovídajícími tloušťce izolace a rozměrům článků. K měděným průchodkám jsem pomocí teplovodivé pasty připevnil hliníkový plech ve tvaru U, který by měl přispět k homogennímu rozložení teploty v komoře (Obrázek4.16).

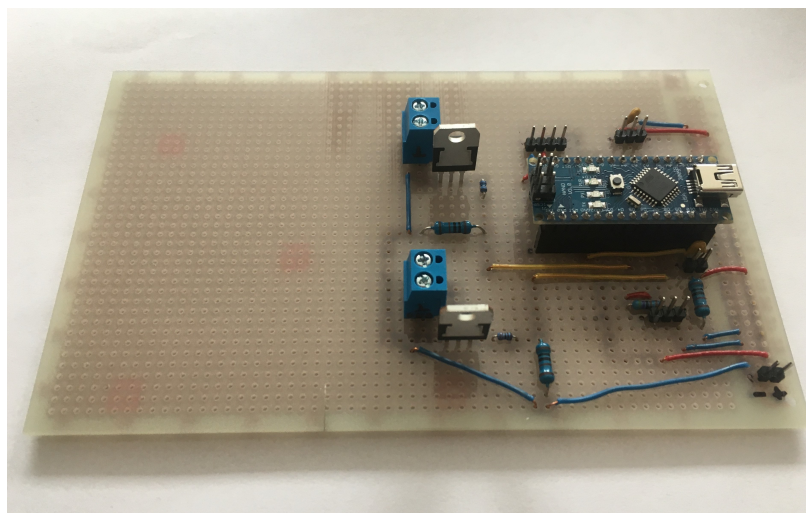
4.4 Elektronika

Výsledné řídicí obvody komory obsahují poměrně malé množství komponent, proto jsem se rozhodl pro osazení použít univerzální vrtaný plošný spoj [38].



Obrázek 4.16: Dokončený chlazený prostor komory

Osazená deska je na Obrázku 4.17 (bez připevněných chladičů tranzistorů) kompletní schéma je pak uvedeno v příloze C. Mikrokontrolér byl osazen do dutinkových lišt, lze jej tedy v případě potřeby z desky vyjmout. Napájení, teplotní senzor a ovládací prvky (displej, tlačítko a potenciometr) jsou připojeny pomocí tzv. DuPont konektorů ke kolíkovým lištám, osazeným na desce. Připojení Peltierových článků je zajištěno dvěma šroubovacími svorkovnicemi.

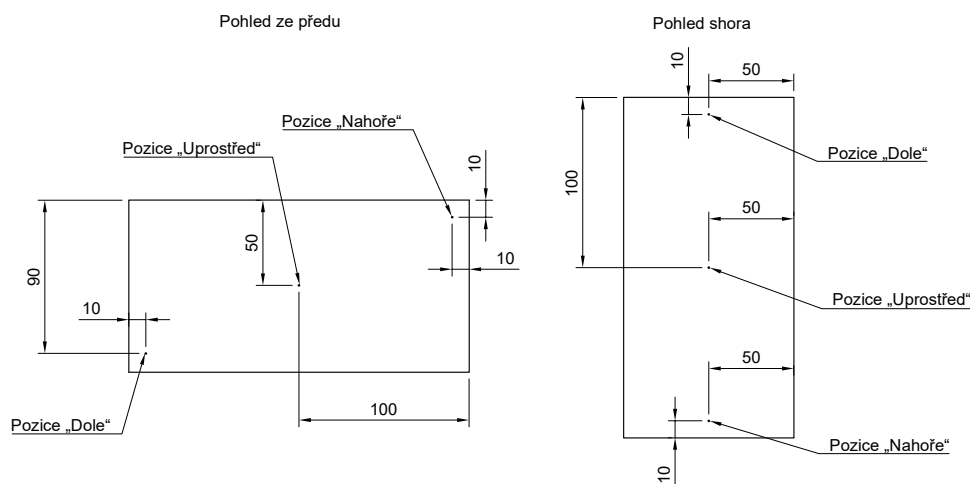


Obrázek 4.17: Osazený vrtaný spoj

Kapitola 5

Měření dosažených parametrů teplotní komory

V první části měření jsem se nejprve soustředil na zjištění nejnižší dosažené teploty v komoře. Pro tento účel byly Peltierovy články napojeny přímo ke zdroji. Mikrokontrolér zde tedy plnil funkci měření a zobrazování teploty. Teplotu jsem postupně změřil na třech pozicích uvnitř teplotní komory z důvodu zjištění homogenity vnitřní teploty. Jednotlivé pozice jsou zakresleny a popsány v Obrázku 5.1.



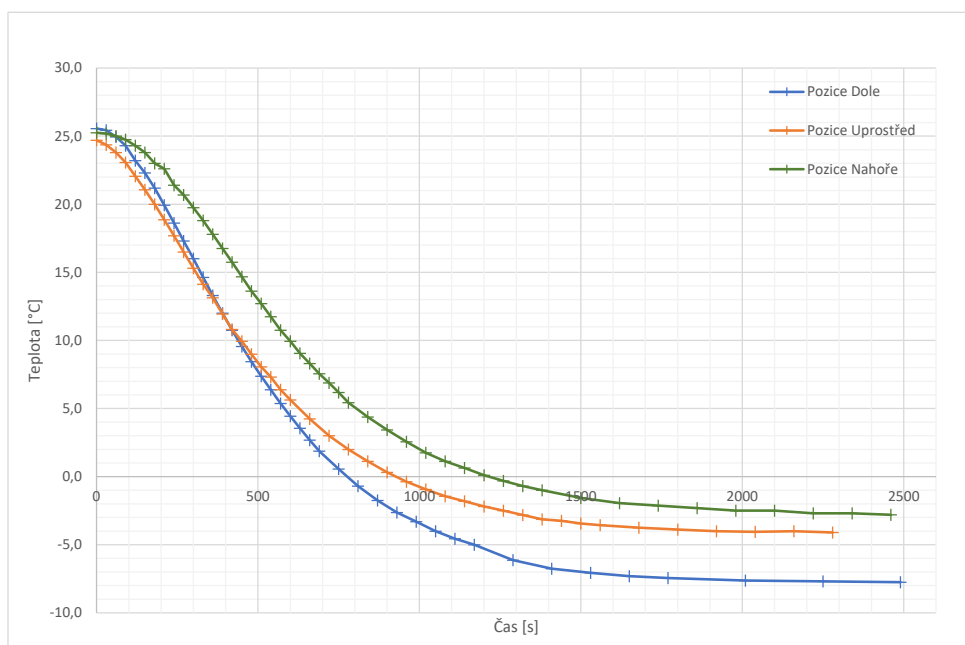
Obrázek 5.1: Nákres jednotlivých pozic teplotního senzoru

Teplota byla měřena senzorem komory DS18B20. Senzor byl vždy na daném místě připevněn k malému plastovému stojánku. U každého měření je také udána teplota vnějšího prostředí, která byla rovněž měřena senzorem DS18B20. Tento druhý senzor však není součástí systému komory, údaje z něj byly zobrazeny na počítači. Další částí bylo měření průběhu regulace teploty v komoře.

5.1 Měření dosažení nejnižší teploty a homogenity

5.1.1 Měření bez míchání vzduchu uvnitř komory

V první sérii měření jsem měl za cíl ověřit jak nejnižší dosaženou teplotu, tak homogenitu teploty uvnitř. O homogenní rozložení teploty se v tomto případě staral pouze hliníkový plech na vnitřní stěně komory, tj. vzduch uvnitř nebyl nijak míchán. Společný graf závislosti teploty na čase je na Obrázku 5.2. V Tabulkách 5.1, 5.2 a 5.3 jsou pak uvedeny naměřené údaje. Odečet hodnot jsem na začátku měření prováděl každých 30 s. Když pokles teploty začal zpomalovat, zaznamenával jsem hodnoty pouze po 60 s a se zvětšujícím se zpomalením poklesu pak dále po 120 s a 240 s.



Obrázek 5.2: Průběh teploty v závislosti na čase (bez míchání vzduchu)

Na počátku všech průběhů si lze povšimnout pomalejšího poklesu teploty přibližně do času 90 sekund. Tento pomalý pokles pravděpodobně způsobují měděné průchodky spojující Peltierovy články a hliníkový plech uvnitř komory, jelikož mají samy o sobě určitou tepelnou kapacitu. Z grafu lze také vidět, že rozložení teploty není homogenní (teplota mezi pozicemi „dole“ a „nahore“ se lišila o 5,1 °C), s ohledem na relativně malý objem komory.

Teplota v pozici „dole“ klesala nejstrměji, v časovém intervalu 90 s až 690 s, kde by se pokles teploty dal označit za lineární, klesala teplota průměrnou rychlostí přibližně $2,2 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. V čase 41 minut se pak teplota již významně neměnila (maximální změna v této oblasti byla 0,1 °C). Rozhodl jsem se tedy považovat teplotu za ustálenou a ukončit zde měření. Na konci měření byla teplota v této pozici -7,8 °C.

Při měření v pozici „uprostřed“ klesala teplota lineárně v intervalu 90 s až 600 s. Průměrná rychlost poklesu teploty zde byla $2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Teplota se ustálila na $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V pozici „nahore“ klesala teplota nejpomaleji průměrnou rychlostí asi $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ a ustálila se na hodnotě $-2,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabulka 5.1 : Měření v pozici „Dole“

Teplota okolního prostředí: $25,8^{\circ}\text{C}$					
Čas [s]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Čas [s]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Čas [s]	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
0	25,6	420	10,8	990	-3,3
30	25,4	450	9,6	1050	-4,0
60	25,0	480	8,4	1110	-4,6
90	24,3	510	7,4	1170	-5,0
120	23,2	540	6,4	1290	-6,1
150	22,3	570	5,4	1410	-6,8
180	21,2	600	4,4	1530	-7,1
210	19,9	630	3,6	1650	-7,3
240	18,6	660	2,7	1770	-7,4
270	17,3	690	1,9	2010	-7,6
300	16,0	750	0,6	2250	-7,7
330	14,6	810	-0,7	2490	-7,8
360	13,3	870	-1,8	-	-
390	12,0	930	-2,6	-	-

Tabulka 5.2 : Měření v pozici „Uprostřed“

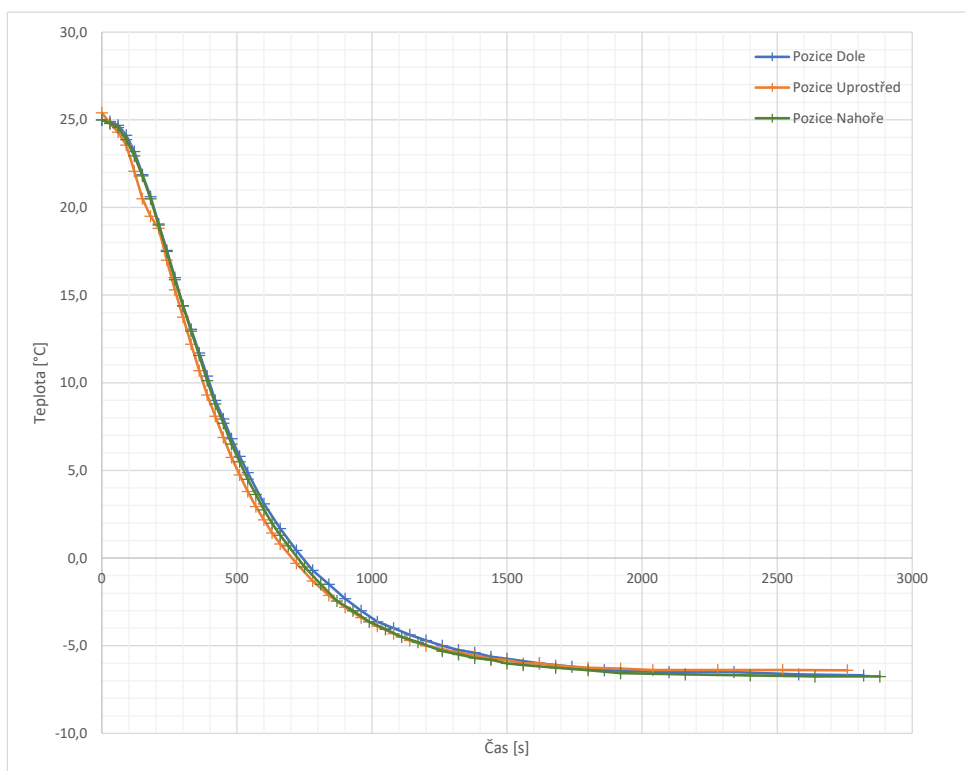
Teplota okolního prostředí: 25,2° C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	24,7	450	9,9	1230	-2,4
30	24,4	480	9,0	1290	-2,8
60	23,8	510	8,1	1350	-3,0
90	23,1	540	7,3	1410	-3,1
120	22,1	570	6,4	1470	-3,3
150	21,1	600	5,6	1530	-3,5
180	20,0	660	4,3	1590	-3,6
210	18,9	720	3,0	1650	-3,7
240	17,7	780	2,0	1710	-3,8
270	16,5	840	1,1	1830	-3,9
300	15,3	900	0,3	1950	-4,1
330	14,1	990	-0,7	2070	-4,1
360	13,1	1050	-1,2	2190	-4,0
390	11,9	1110	-1,6	2310	-4,0
420	10,8	1170	-2,0	-	-

Tabulka 5.3 : Měření v pozici „Nahore“

Teplota okolního prostředí: 25,6° C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	25,3	450	14,7	1020	1,8
30	25,2	480	13,6	1080	1,1
60	25,0	510	12,7	1140	0,6
90	24,8	540	11,8	1200	0,1
120	24,3	570	10,8	1260	-0,3
150	23,8	600	9,9	1320	-0,7
180	23,0	630	9,1	1380	-1,0
210	22,6	660	8,3	1500	-1,6
240	21,4	690	7,6	1620	-1,9
270	20,7	720	6,9	1740	-2,1
300	19,8	750	6,2	1860	-2,3
330	18,8	780	5,4	1980	-2,5
360	17,8	840	4,4	2100	-2,5
390	16,8	900	3,4	2220	-2,7
420	15,8	960	2,6	2340	-2,7

5.1.2 Měření s mícháním vzduchu uvnitř komory

Předchozí měření ukázalo, že komora je schopna chladit na poměrně nízkou teplotu. Homogenita teploty uvnitř komory byla však neuspokojivá. Z tohoto důvodu jsem do prostřední části komory umístil malý 12 V ventilátor o průměru 40 mm, který by měl pomoci s rovnoměrným rozložením teploty v komoře. Průběh měření i pozicemi teplotního senzoru byly stejné jako v předcházejícím bodě. Výsledné průběhy jsou na Obrázku 5.3, naměřené hodnoty jednotlivých průběhů jsou zaneseny v Tabulkách 5.4, 5.5 a 5.6.



Obrázek 5.3: Průběh teploty v závislosti na čase (s mícháním vzduchu)

Z výsledných průběhů lze usoudit, že použití ventilátoru uvnitř komory bylo úspěšné. A došlo k rovnoměrnému rozložení teploty. Výsledné průběhy se pouze mírně odchyľují. Na všech pozicích měření teplota klesala v lineární oblasti (120 s až 600 s) přibližně stejnou průměrnou rychlostí asi $2,3 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Rychlost chlazení poté začala klesat a teplota se ve všech místech měření ustálila mezi hodnotami $-6,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $-6,8 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Tabulka 5.4 : Měření v pozici „Dole“ s mícháním vzduchu

Teplota okolního prostředí: 25,4° C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	25,0	420	9,0	1140	-4,4
30	24,9	450	7,9	1200	-4,7
60	24,7	480	6,8	1260	-5,0
90	24,1	510	5,8	1320	-5,3
120	23,2	540	4,9	1380	-5,4
150	21,9	600	3,1	1440	-5,6
180	20,6	660	1,7	1500	-5,8
210	19,1	720	0,4	1620	-6,0
240	17,6	780	-0,7	1740	-6,2
270	16,0	840	-1,5	1860	-6,4
300	14,4	900	-2,3	2100	-6,5
330	13,1	960	-3,0	2340	-6,5
360	11,7	1020	-3,6	2580	-6,6
390	10,4	1080	-4,0	2820	-6,7

Tabulka 5.5 : Měření v pozici „Uprostřed“ s mícháním vzduchu

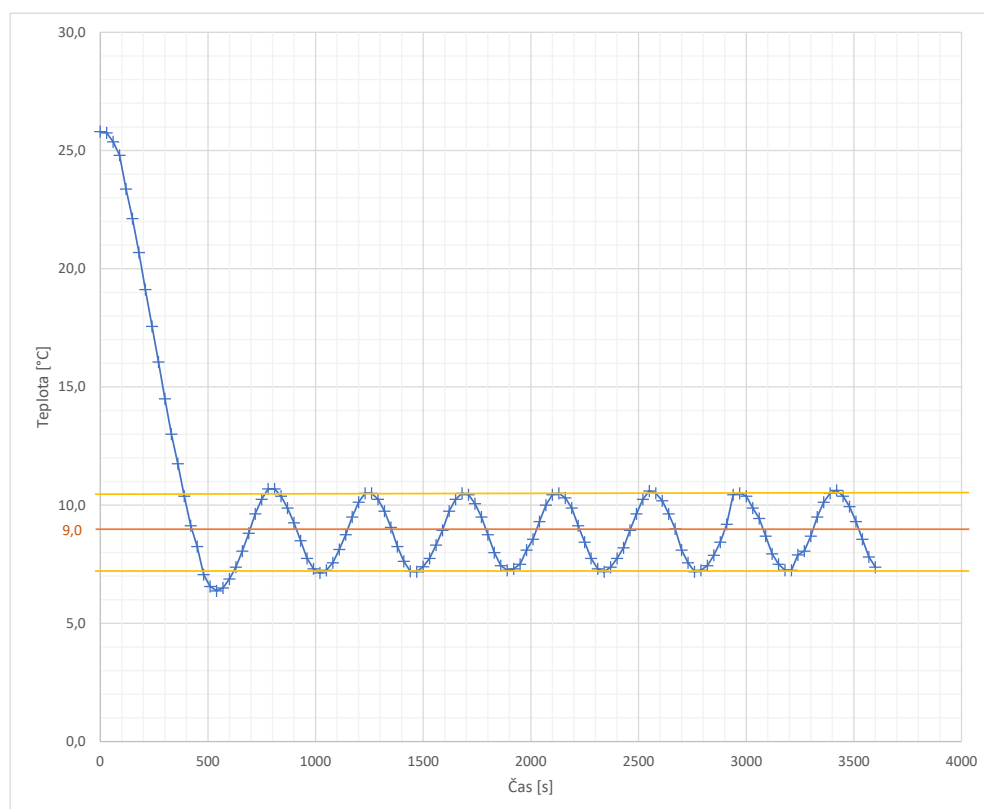
Teplota okolního prostředí: 26,0° C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	25,4	480	5,8	1260	-5,2
30	24,8	510	4,8	1320	-5,4
60	24,3	540	3,8	1380	-5,6
90	23,6	570	2,9	1440	-5,8
120	22,1	600	2,2	1500	-5,8
150	20,5	630	1,4	1560	-6,0
180	19,5	660	0,8	1620	-6,0
210	18,8	720	-0,3	1680	-6,1
240	17,0	780	-1,3	1800	-6,3
270	15,3	840	-2,1	1920	-6,3
300	13,8	900	-2,8	2040	-6,4
330	12,2	960	-3,4	2280	-6,4
360	10,7	1020	-3,9	2520	-6,4
390	9,3	1080	-4,3	2760	-6,4
420	8,1	1140	-4,7	-	-
450	6,9	1200	-5,0	-	-

Tabulka 5.6 : Měření v pozici „Nahoře“ s mícháním vzduchu

Teplota okolního prostředí: 25,1° C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	25,0	450	7,7	1110	-4,5
30	24,8	480	6,5	1170	-4,8
60	24,6	510	5,5	1260	-5,3
90	23,9	540	4,5	1320	-5,5
120	22,9	570	3,6	1380	-5,7
150	21,8	600	2,8	1440	-5,8
180	20,5	630	2,0	1500	-6,0
210	19,0	660	1,3	1560	-6,1
240	17,5	690	0,7	1680	-6,3
270	15,9	750	-0,5	1800	-6,4
300	14,4	810	-1,5	1920	-6,6
330	13,0	870	-2,4	2160	-6,6
360	11,6	930	-3,0	2400	-6,7
390	10,1	990	-3,6	2640	-6,8
420	8,8	1050	-4,1	2880	-6,8

5.2 Měření regulace teploty

V této části měření jsem se zaměřil na průběh regulace teploty. V daném případě byl teplotní senzor umístěn v pozici „uprostřed“. Vzduch uvnitř komory byl po dobu měření míchán ventilátorem (viz. předchozí bod). Jako požadovanou teplotu v komoře jsem zvolil hodnotu 9 °C. Jak bylo již podrobně popsáno v části 3.5.6, jestliže dojde k poklesu teploty pod stanovenou hodnotu, dojde k vypnutí článků a pokud dojde k překročení požadované hodnoty články se sepnou. Naměřené hodnoty jsou zaneseny v Tabulce 5.7, na Obrázku 5.4 je graf průběhu regulace teploty.



Obrázek 5.4: Průběh regulace teploty v závislosti na čase

Pro názornost jsem do výsledného grafu zakreslil také požadovanou teplotu (oranžová přímka) a pásmo hodnot, ve kterém se teplota během regulace pohybovala (žluté přímky). Po prvním vypnutí Peltierových článků, ke kterému došlo přibližně v čase 420 s, teplota dále klesala vlivem setrvačnosti systému k hodnotě 6,4 °C. Po dosažení této hranice teplota začala opět stoupat, k opětovnému sepnutí článků poté došlo v čase 700 s, teplota poté vystoupala na hodnotu 10,7 °C, načež opět došlo k jejímu poklesu. Po těchto prvotních dvou výchylkách dále již teplota nepřekračovala hodnotu 10,6 °C a nepoklesla pod hodnotu 7,2 °C.

Tabulka 5.7 : Měření průběhu regulace teploty

Teplota okolního prostředí: 26,5°C					
Nastavená teplota: 9,0°C					
Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]	Čas [s]	Teplota [°C]
0	25,8	1230	10,5	2460	8,9
30	25,8	1260	10,5	2490	9,6
60	25,4	1290	10,3	2520	10,3
90	24,8	1320	9,8	2550	10,6
120	23,4	1350	9,1	2580	10,5
150	22,1	1380	8,3	2610	10,2
180	20,7	1410	7,6	2640	9,6
210	19,1	1440	7,2	2670	9,0
240	17,6	1470	7,2	2700	8,1
270	16,1	1500	7,4	2730	7,6
300	14,5	1530	7,8	2760	7,2
330	13,0	1560	8,3	2790	7,3
360	11,8	1590	8,9	2820	7,4
390	10,4	1620	9,8	2850	7,9
420	9,1	1650	10,3	2880	8,4
450	8,3	1680	10,5	2910	9,2
480	7,1	1710	10,4	2940	10,4
510	6,6	1740	10,1	2970	10,5
540	6,4	1770	9,5	3000	10,4
570	6,5	1800	8,8	3030	9,9
600	6,9	1830	8,0	3060	9,4
630	7,4	1860	7,4	3090	8,7
660	8,1	1890	7,3	3120	7,9
690	8,8	1920	7,3	3150	7,5
720	9,6	1950	7,5	3180	7,3
750	10,3	1980	8,1	3210	7,3
780	10,7	2010	8,6	3240	7,9
810	10,7	2040	9,3	3270	8,1
840	10,4	2070	10,0	3300	8,7
870	9,9	2100	10,4	3330	9,5
900	9,3	2130	10,5	3360	10,1
930	8,5	2160	10,3	3390	10,5
960	7,8	2190	9,9	3420	10,6
990	7,3	2220	9,1	3450	10,4
1020	7,1	2250	8,4	3480	9,9
1050	7,3	2280	7,8	3510	9,3
1080	7,6	2310	7,3	3540	8,6
1110	8,1	2340	7,2	3570	7,8
1140	8,8	2370	7,4	3600	7,4
1170	9,5	2400	7,8	-	-
1200	10,1	2430	8,2	-	-

5.3 Zhodnocení dosažených výsledků

Na základě výsledků získaných měření hodnotím návrh komory jako úspěšný. Při měření nejnižší teploty (bez míchání vzduchu) bylo dosaženo u dna komory teploty $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplota uvnitř komory byla však značně nehomogenní (u víka komory teplota klesla pouze na $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$). Po použití ventilátoru uvnitř komory ale došlo k rovnoměrnému rozložení teploty a nejnižší naměřená teplota se ve všech místech pohybovala mezi -6 až $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, což označuji jako dobrý výsledek.

Při měření průběhu regulace se teplota pohybovala okolo požadované hodnoty s maximální odchylkou $2,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (takto velká odchylka byla však pouze jednorázová v počátku měření, v dalším průběhu měření se teplota neodchýlila o více než $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$). Vzhledem ke způsobu použité regulace lze však takovou odchylku předpokládat. Tato komora by proto mohla být například použita v nekritických aplikacích, které nevyžadují přesnou regulaci teploty.

V budoucnu je zde také prostor pro možná vylepšení. Prvním by mohlo být použití spojité regulace, která je náročnější na realizaci, ovšem dokázala by zmenšit, či téměř eliminovat větší odchylky od nastavené teploty. Dalším vylepšením by mohlo být zabudování vnitřního ventilátoru do stěny komory, jelikož nyní je umístěn v plastovém stojánku v prostřední části komory. Případným zabudováním slotu pro paměťovou SD kartu, na kterou by byl zaznamenáván průběh teploty během měření, by se předešlo nutnosti častého zaznamenávání hodnot uživatelem. Posledním vylepšením, které jsem dodatečně realizoval, bylo doplnění 50 mm ventilátoru jako aktivního chlazení spínacích tranzistorů, jež byly osazeny menšími chladiči než bylo zamýšleno, a to z důvodu kapacity vnitřních prostor sekce s elektronikou.

Kapitola 6

Ekonomická rozvaha

Cílem této kapitoly je provést jednoduchý odhad ceny teplotní komory. V první části jsem určil celkovou cenu veškerého použitého materiálu. Pro lepší orientaci jsou položky rozděleny na konstrukční materiály (Tabulka 6.1) a na elektrické součástky (Tabulka 6.2). Celkové náklady na materiál v konečném součtu činí 6 878,- Kč.

Další částí je jednoduchý odhad ceny, za kterou by se komora prodávala. Přesto, že se jedná spíše o prototyp s poměrně malým objemem, mohla by tato komora najít využití například jako laboratorní nebo zdravotnický chladič box pro ukládání zkumavek se vzorky, které nejsou citlivé na určité změny teploty, k nimž uvnitř komory dochází z důvodu použití dvoupolohové regulace.

Pokud vezmeme v úvahu, že některé položky vystačí na výrobu více kusů komor (například deska extrudovaného polystyrenu či lepidlo) můžeme výslednou cenu komory snížit na přibližně 6260 Kč. Při vícekusové výrobě by se do této ceny dále mohlo promítnout snížení z důvodů množstevních slev. K této ceně ještě připočítejme náklady na vyřezání plastových dílů pro vícekusovou výrobu, které činily odhadem 300 Kč na jednu komoru. Výroba komory by poté spočívala pouze v sestavení. Doba sestavení jedné komory by byla asi 3 pracovní dny, což by při sazbě 90 Kč/hod činilo 2 160 Kč. Výše popsané položky označme jako variabilní náklady (V_n). K těmto nákladům je ještě nutné připočítat pevné náklady (P_n), jež jsou tvořeny náklady na vývoj a testování, a které by činily odhadem 8 000 Kč. Pokud by se celkem vyrobilo například 2000 kusů, celkové náklady by se tedy určily jako

$$C_n = P_n + V_n \cdot 2000. \quad (6.1)$$

Výsledná suma by byla 17 448 000 Kč. Pokud tuto částku vydělíme počtem kusů, získáme náklady na kus, které činí 8724 Kč. Pokud ještě připočteme ke každé komoře náš výtěžek ve výši 275 Kč, bude výsledná cena odhadem 8999 Kč.

Tabulka 6.1 : Ekonomická rozvaha - Konstrukční a jiné materiály

<i>Položka</i>	Ks	Cena/ks [Kč]	Celkem [Kč]
ABS deska; 1x493x329mm	5	149	745
Extrudovaný polystyren, 30x1260x610mm	1	129	129
Lepidla	-	-	228
Pěnové těsnění Tesamoll	1	55	55
Rukojeť	1	20	20
Pant, niklovaná ocel	2	20	40
Mřížka na chladič - 120mm	2	69	138
Spojovací materiál (Matice, šrouby, podložky)	-	-	48
Teplivodivá pasta EXTRÉM	1	125	125
Kovové díly (průchodky + chladiče tranzistorů)	-	-	250
Ventilátor 40 mm	1	89	89
Ventilátor 50 mm	1	93	93

Tabulka 6.2 : Ekonomická rozvaha - Elektronické součástky

<i>Položka</i>	Ks	Cena/ks [Kč]	Celkem [Kč]
Peltierův článek TEC-127080S, 40x40mm	2	259	518
Chladič na procesor, Hyper 212	2	882	1764
Spínaný zdroj MEAN WELL, SP-240-12	1	1360	1360
LCD displej, 16x2, I2C, modrý	1	159	159
Vývojový kit ARDUINO Nano, V3.0 R3	1	249	249
Teplotní senzor s kabelem, DS18B20	1	99	99
Unipolární tranzistor, STP36NF06L	2	25	50
Tlačítkový spínač PBS-12B-G	1	10	10
Potenciometr 10k, lineární	1	21	21
DC/DC měnič, step-down	1	88	88
Univerzální vrtaný spoj, 160x100mm	1	149	149
Rezistory	-	-	15
Dutinková lišta 1x15pin	2	8	16
Krimpovací kontakt	12	1	12
Konektory	-	-	10
Vodiče	-	-	225
Vidlice počítačová, 230V	1	8	8
Napájecí kabel k PC, 230V	1	76	76
Cínová pájka, 100 g	1	169	169

Kapitola 7

Závěr

V práci byly nejprve popsány základní fyzikální jevy a principy týkající se termoelektrických jevů a jejich využití pro chlazení. Dále pak byla popsána konstrukce a vlastnosti Peltierova článku, který je následně využit pro chlazení celé komory.

Další částí je návrh komory na základě blokového schématu, kdy je popsána funkce a způsob realizace každého bloku. Jde o celkovou konstrukci komory a její rozložení, napájení komory a řídicí elektroniku včetně měření teploty, ovládání komory, spínání Peltierových článků a způsob regulace teploty uvnitř komory. Následuje kompletní popis procesu konstrukce komory včetně fotografií. Práce obsahuje rovněž podrobný výkres komory.

Nedílnou součástí práce je naměření dosažených vlastností komory, přičemž se jedná o nejnižší dosaženou teplotu a homogenitu rozložení teploty uvnitř komory, a to při porovnání stavu bez míchání a s mícháním vzduchu uvnitř s pomocí ventilátoru. Byl také změřen průběh regulace teploty v komoře, výsledky byly zhodnoceny a na základě těchto výsledků a postřehů během měření byla navržena některá vylepšení (v budoucnu by například mohla být doplněna spojitá regulace teploty uvnitř komory). Navržená komora však celkově dostala požadavkům kladeným v zadání.

Poslední částí byla ekonomická rozvaha sestavené komory včetně jednoduchého odhadu ceny.



Literatura

- [1] KUBEŠ, Pavel a Zdeněk KYNCL. *Fyzika I*. Vydání třetí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02671-X.
- [2] ČERVENKA, Milan a Ladislav SIEGR. *Měření na Peltierově článku*. [online]. 24. září 2015 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody/peltier.pdf>
- [3] KRÁLOVÁ, Magda. Termoelektrické jevy. In: *Techmania Eduportál* [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektricky-proud/termoelektricke-jevy>
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Seebeckův jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [5] Basic principles of thermocouples. *Embedded* [online]. September 14, 2016. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/basic-principles-of-thermocouples/>
- [6] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/911-peltieruv-jev>
- [7] LEE, HoSung. *Thermoelectrics: design and materials*. Chichester (United Kingdom): John Wiley, 2017. ISBN 9781118848951.
- [8] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: Součástky a obvody Principy a příklady*. 3.rozšířené vydání. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.
- [9] Vlastní vodivost polovodiče. *ELUC* [online]. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/569>
- [10] Frequently Asked Questions on Thermoelectrics. *TE Technology, INC.* [online]. c2021. [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://tetech.com/faqs/#1>

- [11] GROMOV, G. Thermoelectric Cooling Modules. [online]. GLOBAL PHOTONICS APPLICATIONS & TECHNOLOGY [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf
- [12] GOLDSMID, H. Julian. *Introduction to thermoelectricity*. Second Edition. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-662-49255-0.
- [13] MIRAMANTO, M., S. SYAHRUL a Yusi WIRDAN. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2019, 22(1), 177-184 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006>
- [14] PANDEY, Purnendu Shekhar, Mahesh Kumar AGHWARIYA, Ranjan PRAFUL a Ginne RANI. The Real-Time Hardware Design and Simulation of Thermoelectric Refrigerator System Based on Peltier Effect. In: *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices* [online]. Singapore, 2017, 581-589 [cit. 2021-01-07]. Dostupné z: <https://rdcu.be/cddtL>
- [15] *Internetový obchod společnosti PV model* [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.pvmodel.cz/produkt/abs-deska-bila-15x493x329mm-u13102>
- [16] ÖZLÜSOYLU, İsmail a Abdullah İSTEK. The Effect of Hybrid Resin Usage on Thermal Conductivity in Ecological Insulation Panel Production. In: *4th International Conference on Engineering Technology and Applied* [online]. Kiev, April 2019. 292-296 [cit. 2021-4-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333164278_The_Effect_of_Hybrid_Resin_Usage_on_Thermal_Conductivity_in_Ecological_Insulation_Panel_Production
- [17] *Internetový obchod společnosti GM electronic* [online]. c1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/peltieruv-clanek-tec1-12708-vigan>
- [18] *Internetový obchod společnosti GM electronic* [online]. 1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/spinany-zdroj-mean-well-rsp-320-12>
- [19] *Internetový obchod GM electronic* [online]. 1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/modul-dc-dc-step-down-1-25-32v-5a>
- [20] *Internetový obchod Cooler Master* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.coolermaster.com/catalog/coolers/cpu-air-coolers/hyper-212-black-edition/#image-Item1>

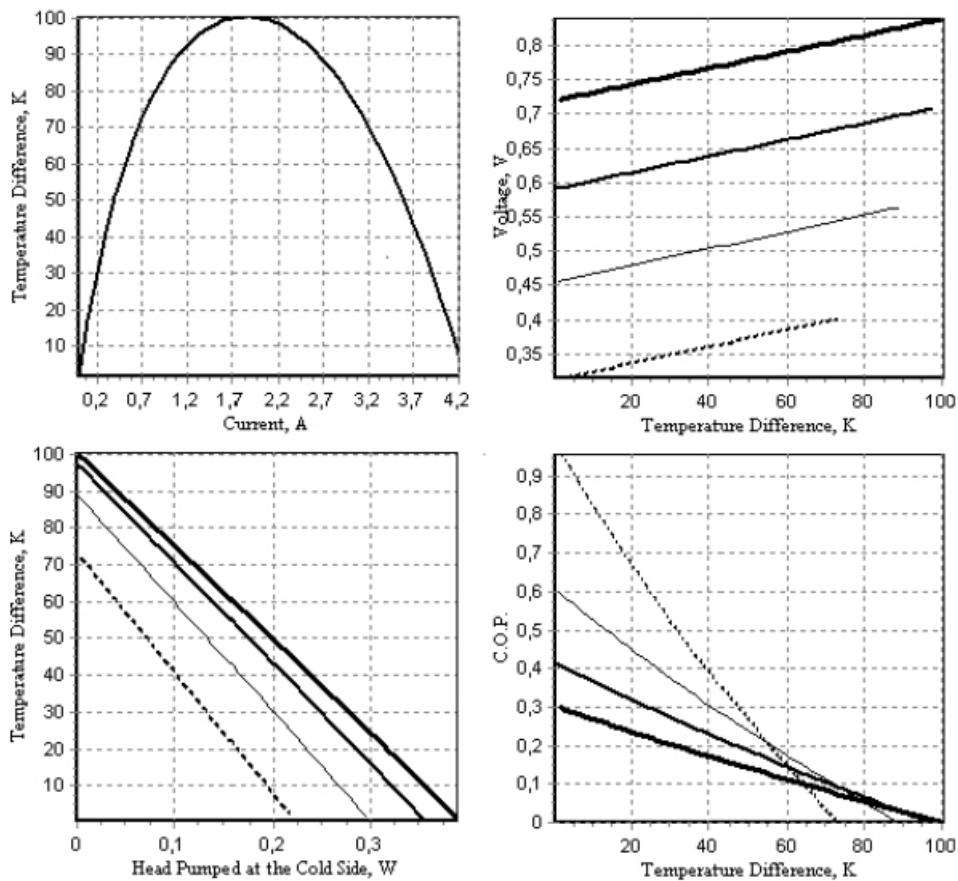
- [21] Heat Pipes for Thermal Management. *Advanced cooling technologies* [online]. c2021 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: <https://www.1-act.com/innovations/heat-pipes/#benefits>
- [22] *Jednočipové mikropočítače* [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap9/jednocpoc.html>
- [23] *Webové stránky společnosti Arduino* [online]. c2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [24] *Webové stránky společnosti Arduino* [online]. c2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/>
- [25] *Webové stránky společnosti Arduino* [online]. c2021 [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/guide/environment>
- [26] *Internetový obchod společnosti GM Electronics* [online]. 1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/digitalni-teplotni-cidlo-s-ds18b20>
- [27] *Katalogový list teplotního senzoru DS18B20* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [28] MALÝ, Martin. Sběrnice 1-Wire. *HW server* [online]. c1997 - 2014 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz//navrh-obvodu/rozhrani/sbernice-1-wiretm.html>
- [29] *Katalogový list tranzistoru STP36NF06L* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-196.1.pdf>
- [30] MOSFET as a Switch. *Electronics Tutorials* [online]. c2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.electronicstutorials.ws/transistor/tran_7.html
- [31] JOHANNECK, Don. *How to Select a MOSFET for Logic Circuits or Gate Design* [online]. 19.05.2020 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/blog/how-to-select-a-mosfet-for-logic-circuits-or-gate-design>
- [32] *Internetový obchod společnosti GM Electronics* [online]. c1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/modry-lcd-display-16x2-i2c>
- [33] DUDÁČEK, K. *Sériová rozhraní SPI, Microwire, I2C a CAN* [online]. 2002 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/dudacek/NMS/Seriova_rozhrani.pdf
- [34] Button. *Webové stránky společnosti Arduino* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/BuiltInExamples/Button>

- [35] Reading a Potentiometer (analog input). *Webové stránky společnosti Arduino* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/tutorial/potentiometer>
- [36] LAGACÉ, Michel. Switch Debouncing. *Mike's Electro Shack* [online]. 30 May 2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://lagacemichel.com/2020/05/30/switch-debouncing/>
- [37] *On-off control system* [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/graduate-engineering/signals-systems/control-systems/on-off-control-system/>
- [38] *Internetový obchod společnosti GM Electronics* [online]. c1990–2021 GM electronic, spol. s.r.o. [cit. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/univelzalni-spoj-160-x-100-rm-2-54-kulatebody-din-41612>

Příloha A

Příklad mezních charakteristik Peltierova článku

Převzato z [11].



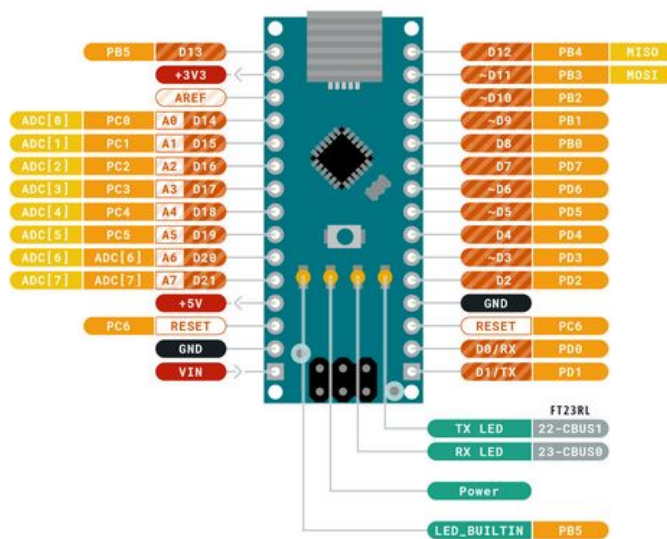
Příloha B

Podrobný popis všech vstupů a výstupů desky Arduino

Převzato z [23].



**ARDUINO
NANO**



- Ground
- Internal Pin
- Digital Pin
- Microcontroller's Port
- Power
- SWD Pin
- Analog Pin
- LED
- Other Pin
- Default

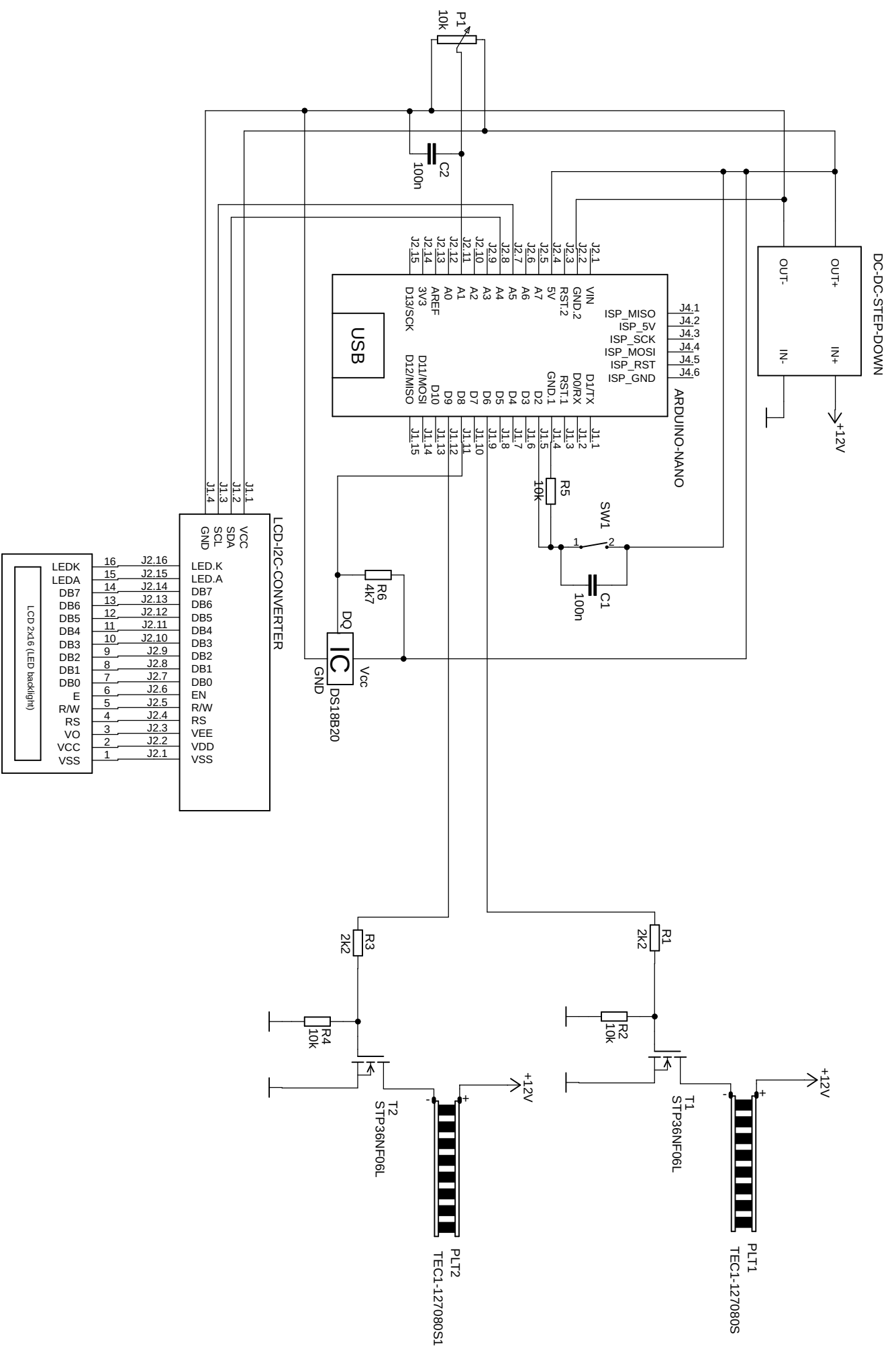


This work is licensed under the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1888, Mountain View, CA 94042, USA.

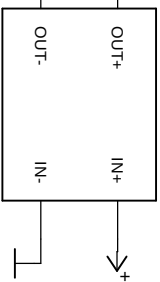


Příloha C

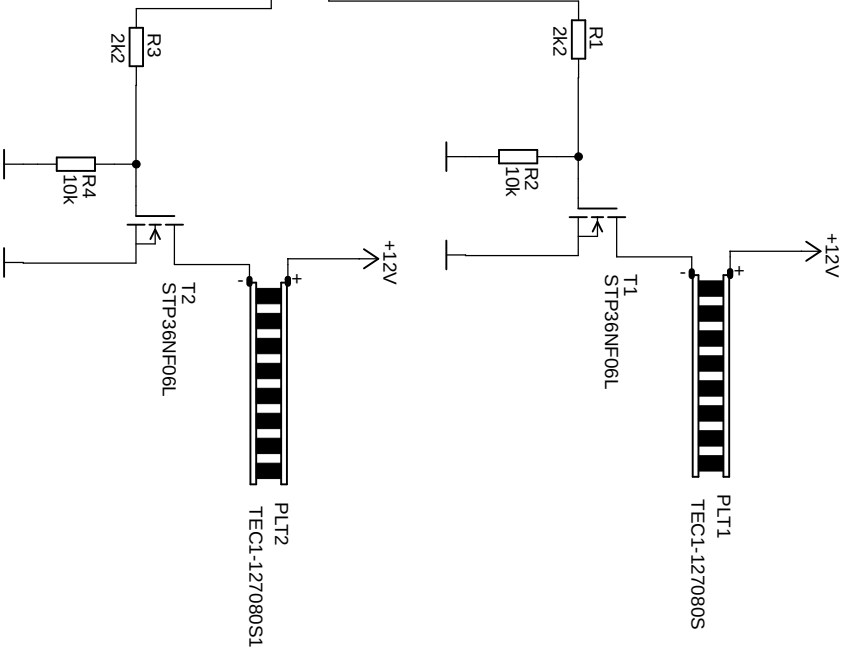
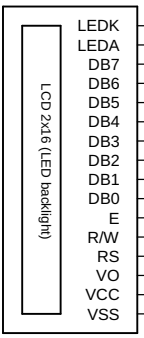
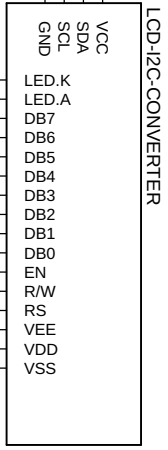
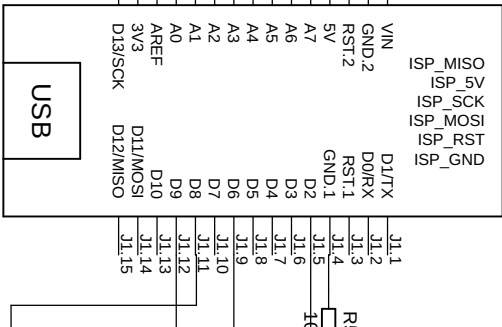
Kompletní obvodové schéma



DC-DC-STEP-DOWN



ARDUINO-NANO



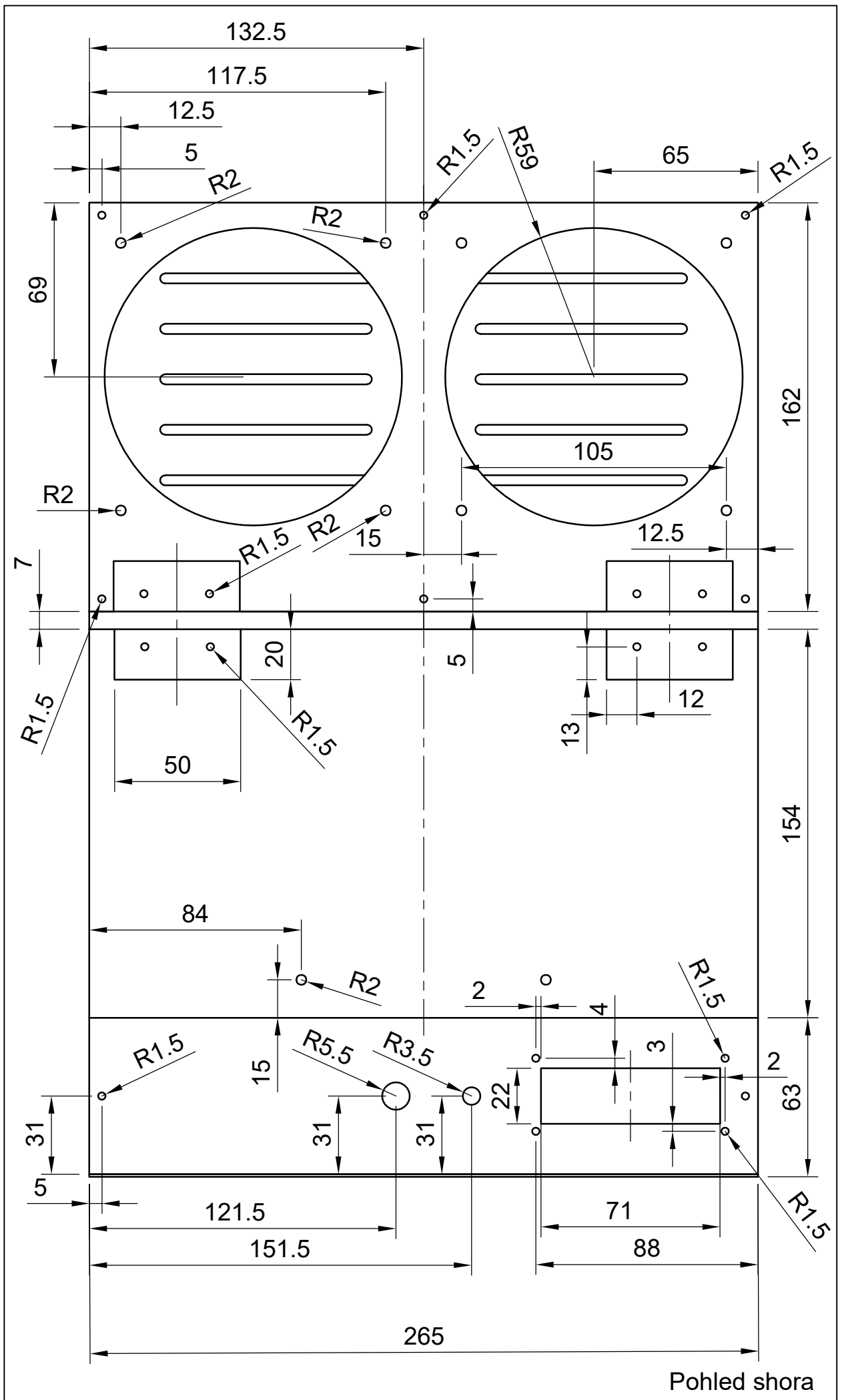
PLT1
TEC1-127080S1

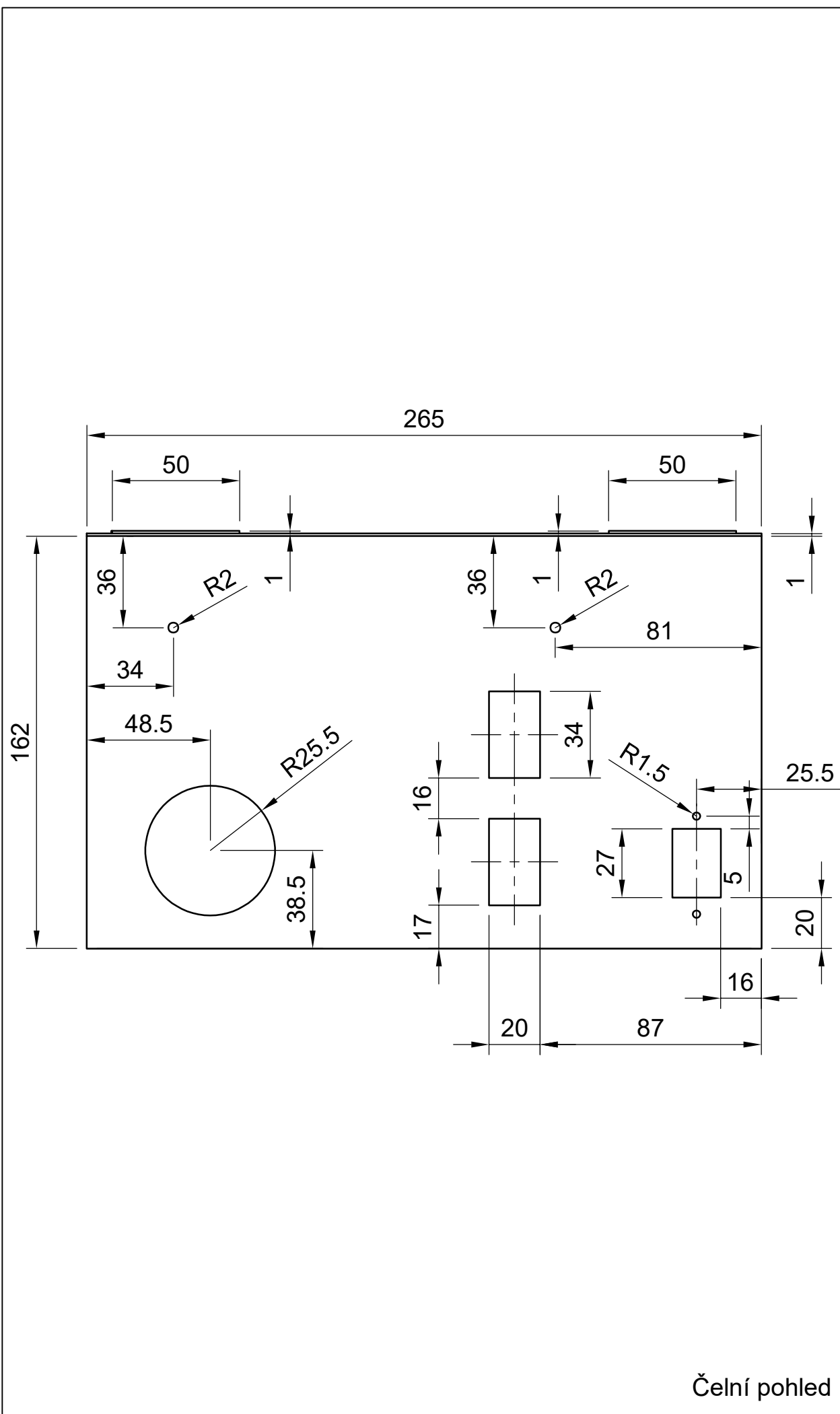
PLT2
TEC1-127080S1



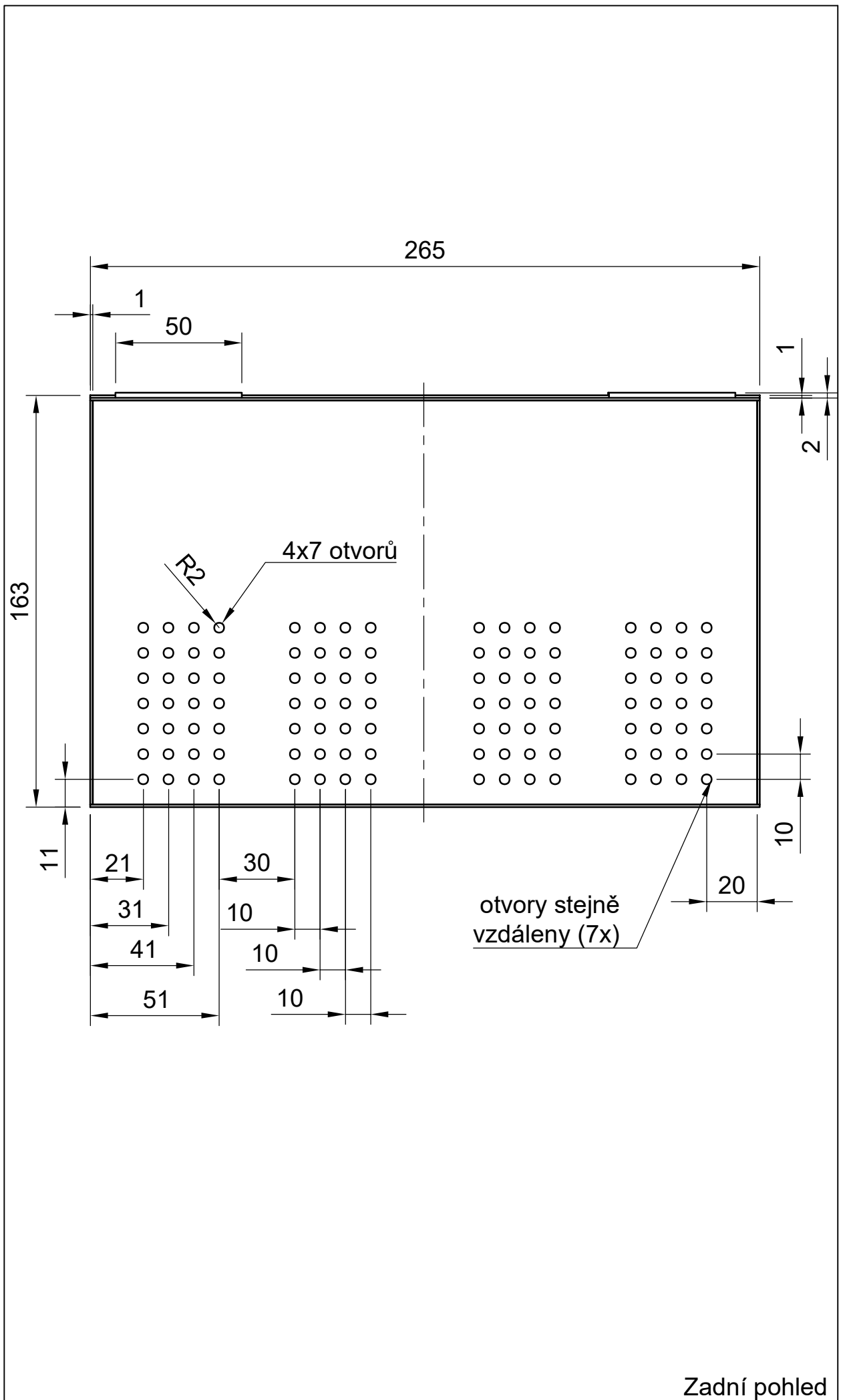
Příloha D

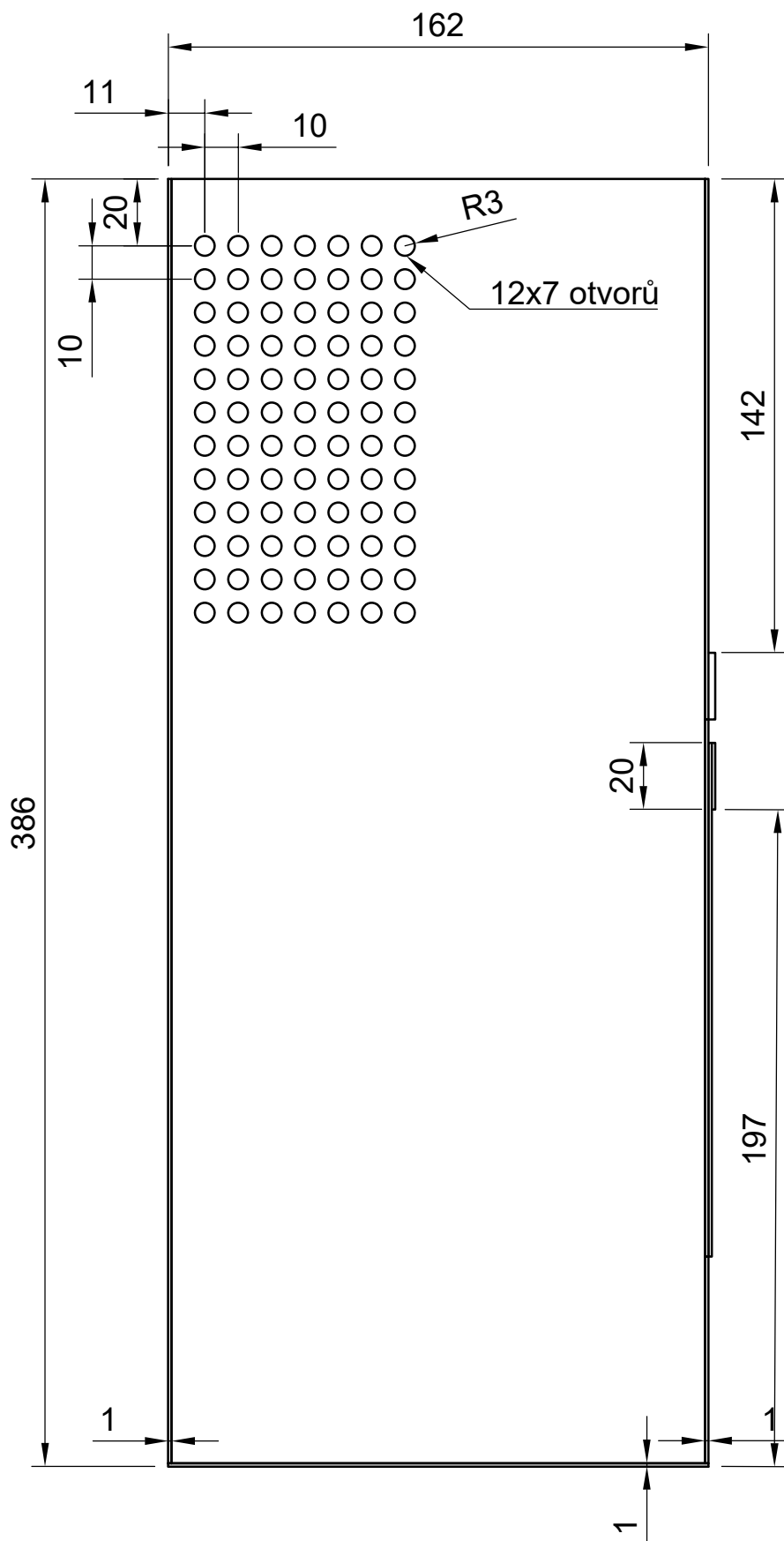
Výkres vnější struktury komory





Čelní pohled





Boční pohled