

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra mikroelektroniky
Obor: Elektronika a komunikace



Řízení teploty Peltierovými články

Temperature control by Peltier cells

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Tomáš Píša
Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Husák, CSc.
Rok: 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Píša** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **492040**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra mikroelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řízení teploty Peltierovými články

Název bakalářské práce anglicky:

Temperature Control by Peltier Cells

Pokyny pro vypracování:

1. Analyzujte současný stav systémů řízení teploty využívajících Peltierovy články.
2. Navrhněte a realizujte přenosnou teplotní komoru s objemem cca 2 dm³, regulaci teploty pomocí Peltierových článků, stejnosměrné napájení 12 V, maximální příkon cca 200 W. Minimalizujte větší rozměry. Pro zvýšení účinnosti Peltierových článků lze použít nucené chlazení ventilátory. Lze použít více Peltierových článků. Navrhněte řídicí elektroniku, pro zobrazení teploty použijte displej, pro měření teploty vhodný teplotní senzor.
3. Zjistěte dosažené parametry realizované teplotní komory, tj. především závislost vnitřní teploty na vnější teplotě, hysterezi udržování vnitřní teploty systému, rychlost dosažení požadované teploty a přesnost regulace teploty.
4. Proveďte ekonomickou rozvahu navrženého systému.

Seznam doporučené literatury:

1. KUBINA, Pavel. Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. Automa. 2005.
2. MIRMANTO, M. et al. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. Engineering Science and Technology, an International Journal. 2019. ISSN 22150986.
3. PANDEY, P. S. et al. The Real-Time Hardware Design and Simulation of Thermoelectric Refrigerator System Based on Peltier Effect. Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices. 2017. ISBN 978-981-10-1707-0.

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: **19.01.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

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

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Tomáš Píša

Poděkování

Děkuji mému vedoucímu prof. Ing. Miroslavu Husákovi, CSc. za vedení a cenné rady k vypracování mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Miroslavu Horníkovi za pomoc s výrobou mechanické části práce. Děkuji také své rodině za podporu při studiu a vytvoření příznivého prostředí pro úspěšnou realizaci této práce.

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou řízení teploty s využitím Peltierových článků. Nejprve je uveden teoretický rozbor včetně rešerše současného stavu systémů řízení teploty s Peltierovými články. Následně je podrobně popsán návrh a výroba teplotní komory umožňující chlazení i ohřev. Teplota v komoře o objemu cca 2 dm³ je řízena pomocí dvojice Peltierových modulů, jejichž spínání ovládá mikrokontrolér. Další část práce se věnuje změření dosažených parametrů realizované teplotní komory. Při pokojové teplotě je možno dosáhnout teploty okolo 7 °C v režimu chlazení, v režimu ohřevu je nastavitelná teplota omezena na 40°C. Hystereze udržování teploty je v obou režimech přibližně 1 °C. Na závěr práce je uvedena ekonomická rozvaha řešící náklady na výrobu prototypu.

Klíčová slova

termoelektrické jevy, Peltierův článek, řízení teploty, teplotní komora

Abstract

This work deals with the issue of temperature control using Peltier cells. First, a theoretical analysis is presented, including a search of the current state of temperature control systems with Peltier cells. Subsequently, the design and manufacture of a temperature chamber enabling cooling and heating is described in detail. The temperature in the chamber with a volume of about 2 dm³ is controlled by a pair of Peltier modules, the switching of which is controlled by a microcontroller. The next part of the work is devoted to measuring the achieved parameters of the realized temperature chamber. At room temperature it is possible to reach a temperature of around 7 °C in cooling mode, in heating mode the adjustable temperature is limited to 40 °C. The temperature maintenance hysteresis is approximately 1 °C in both modes. At the end of the work is an economic balance sheet addressing the cost of prototype production.

Key words

thermoelectric effects, Peltier cell, temperature control, temperature chamber

Obsah

Seznam zkratk a symbolů	xi
Seznam obrázků	xii
Seznam tabulek	xiv
Úvod	1
1 Teoretické základy a rozbor problematiky	3
1.1 Termoelektrické jevy	3
1.1.1 Seebeckův jev	4
1.1.2 Peltierův jev	5
1.2 Peltierův článek	6
1.2.1 Peltierův modul	7
1.2.2 Materiály pro konstrukci Peltierových článků	8
1.3 Systémy řízení teploty využívající Peltierovy články	8
2 Návrh teplotní komory	11
2.1 Termoelektrický chladicí systém	11
2.2 Systém řízení a ovládání komory	12
2.2.1 Tlačítka a indikační LED	13
2.2.2 Obvodové řešení spínání Peltierových modulů	15
2.2.3 Spínací a řídicí obvod ventilátorů	17
2.2.4 Senzory teploty a jejich zapojení	18
2.2.4.1 Senzor teploty v komoře	19
2.2.4.2 Senzory teploty Peltierových modulů	21
2.2.5 Zobrazení informací na LCD	23
2.2.6 Řídicí mikrokontrolér	25
2.2.6.1 Řídicí program	28
2.2.7 Celkové zapojení elektroniky a návrh plošného spoje	30
2.3 Mechanické uspořádání komory	32
2.3.1 Konstrukční řešení skříně komory	32
2.3.2 Konstrukce izolované komory	36
3 Výroba modelu teplotní komory	39
3.1 Výroba skříně zařízení	39
3.2 Realizace chladicích sestav	41
3.3 Výroba DPS	43
3.4 Realizace izolované teplotní komory	44
3.5 Finální kompletace modelu teplotní komory	46
4 Měření dosažených parametrů modelu teplotní komory	49
4.1 Měření nejnižší dosažitelné teploty	49

4.2	Měření regulace chlazení	51
4.3	Měření nejvyšší dosažitelné teploty	54
4.4	Měření regulace ohřevu	56
5	Ekonomická rozvaha	59
	Závěr	61
	Literatura	63
	Přílohy	69
A	Celkové schéma zapojení řídicí elektroniky	69
B	Schémata pro realizaci plošného spoje	70
C	Výkresy plechů tvořících skříň komory	73
D	Fotografie dokumentující výrobu teplotní komory	85
E	Fotografie dokumentující realizovanou teplotní komoru	94
F	Elektronické přílohy	99
F.1	Zkompilovaný řídicí program	99
F.2	Tabulky změřených hodnot	99
F.3	Kompletní seznam použitých součástek a materiálu	99

Seznam zkratek a symbolů

Zkratka	Význam
LED	svítivá dioda (<i>Light-Emitting Diode</i>)
LCD	displej z tekutých krystalů (<i>Liquid Crystal Display</i>)
PWM	Pulzně šířková modulace (<i>Pulse Width Modulation</i>)
SIPO	sérioparalelní převodník (<i>Serial-In Parallel-Out</i>)
RAM	paměť s náhodným přístupem (<i>Random Access Memory</i>)
ROM	paměť umožňující pouze čtení (<i>Read-Only Memory</i>)
CGRAM	paměť znaků řadiče LCD (<i>Character Generator RAM</i>)
ASCII	standardizovaná sada znaků (<i>American Standard Code for Information Interchange</i>)
SSR	polovodičové relé (<i>Solid State Relay</i>)
DPS	deska plošných spojů
μC	mikrokontrolér
PM	Peltierův modul
MOSFET	unipolární tranzistor (<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>)

Symbol	Jednotka	Veličina
W	eV	výstupní práce
I	A	elektrický proud
U	V	elektrické napětí
R	Ω	elektrický odpor
T	°C	teplota
α	$V \cdot K^{-1}$	Seebeckův koeficient
Π	V	Peltierův koeficient
Q	J	teplo
σ	$S \cdot m^{-1}$	měrná elektrické vodivost
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná vodivost

Seznam obrázků

1.1	Dva spojené kovy se stejnou teplotou spoju	4
1.2	Princip Seebeckova jevu	4
1.3	Termočlánek	5
1.4	Znázornění Peltierova jevu v termočlátku	6
1.5	Peltierův článek	6
1.6	Peltierův modul	7
1.7	Kaskádní Peltierův modul	7
2.1	Blokové schéma řídicího systému	12
2.2	Připojení tlačítek k mikrokontroléru	14
2.3	Zapojení indikačních LED	15
2.4	Zapojení pro spínání Peltierových modulů	17
2.5	Spínací obvod ventilátorů	18
2.6	Propojení řídicího pinu ventilátorů s mikrokontrolérem	18
2.7	Způsob vyhodnocení platné hodnoty střídý	19
2.8	Zapojení analogových teplotních senzorů	22
2.9	Označení a funkce jednotlivých pinů Nuclea L432KC	26
2.10	Připojení jednotlivých periférií k mikrokontroléru	27
2.11	Vývojový diagram řídicího programu	29
2.12	Závislost otáček vnějšího ventilátoru na řídicím PWM signálu	29
2.13	Uspořádání teplotní komory	32
2.14	Nákres vrchní části skříně teplotní komory s rozmístěním ovládacích prvků	33
2.15	Horizontální průřez skříní komory znázorňující umístění ohybů pro spojení většiny plechů	34
2.16	Vertikální průřez skříní komory znázorňující umístění vybraných dalších ohybů pro spojení plechů	34
2.17	Uspořádání desek tvořících izolovanou komoru	37
3.1	Zkušebně sestavená skřín komory	40
3.2	Vnější chladič před a po úpravě	42
3.3	Chladičí sestava před zabudováním	43
3.4	Finální podoba modelu teplotní komory	48
4.1	Graf závislostí jednotlivých teplot systému při měření nejnižší dosažitelné teploty	50
4.2	Průběh jednotlivých teplot systému po deaktivaci chlazení	50
4.3	Průběh regulace chlazení s intervalem odečítání 30 s	52
4.4	Průběh regulace chlazení s intervalem odečítání 5 s a změnou požadované teploty v průběhu měření	52
4.5	Detail průběhu regulace chlazení s nastavenou teplotou 15 °C	53

4.6	Detail průběhu regulace chlazení s nastavenou teplotou 10 °C	53
4.7	Graf závislosti jednotlivých teplot systému při měření nejvyšší dosažitelné teploty	54
4.8	Průběh jednotlivých teplot systému po deaktivaci ohřevu	55
4.9	Průběh regulace ohřevu s intervalem odečítání 30 s	56
4.10	Průběh regulace ohřevu s intervalem odečítání 5 s	57
4.11	Detail průběhu regulace ohřevu s nastavenou teplotou 30 °C	57
1	Celkové schéma zapojení řídicí elektroniky	69
2	Šablona k vytisknutí pro výrobu DPS	70
3	Pohled na DPS ze strany spojů	71
4	Pohled na DPS ze strany součástek (schéma pro osazení)	72
5	C.1 Dno	73
6	C.2 Stěna přední	74
7	C.3 Stěna zadní	75
8	C.4 Stěna levá	76
9	C.5 Stěna pravá	77
10	C.6 Příčka levá	78
11	C.7 Příčka pravá	79
12	C.8 Příčka vnitřní	80
13	C.9 Víko levé	81
14	C.10 Víko pravé	82
15	C.11 Víko LCD	83
16	C.12 Víko zvedací	84
17	C.13 Příložka na síťka krytí prúdů k elektronice	84
18	Ověření dostupnosti pinů Nuclea	85
19	Ověření činnosti teplotních senzorů	85
20	Zkušební zapojení na nepájivých polích	86
21	Zkušebně sestavená skříň komory - zepředu zavřená	86
22	Zkušebně sestavená skříň komory - zepředu otevřená	87
23	Zkušebně sestavená skříň komory - detail víka	87
24	Zkušebně sestavená skříň komory - zezadu otevřená	88
25	Natřené plechy skříňové komory	88
26	Detail výřezu v levém vnějším chladiči	89
27	Detail výřezu v pravém vnějším chladiči	89
28	Vyhlazený měděný blok s otvory pro přichycení vnitřního chladiče	90
29	Realizovaný plošný spoj ze strany spojů	90
30	Realizovaný plošný spoj ze strany součástek	90
31	Detail barevného značení jednotlivých konektorů připojených k DPS	91
32	Detail původního způsobu zabudování senzoru teploty v komoře	91
33	Detail konečného umístění senzoru teploty v komoře	91
34	Detail zabudovaného koncového spínače	92
35	Detail zabudovaného koncového spínače - kolmý pohled	92
36	Detail zajišťovacího mechanismu indikačních LED	92
37	Izolovaná komora před složením	93
38	Připojení veškerých komponent k DPS	93
39	Finální podoba modelu teplotní komory - zepředu zavřená	94
40	Finální podoba modelu teplotní komory - detail víka	94
41	Finální podoba modelu teplotní komory - zepředu otevřená	95

42	Finální podoba modelu teplotní komory - zezadu	96
43	Detail izolované komory	96
44	Komora v činnosti - aktivní chlazení	97
45	Detail normálního zobrazení LCD	97
46	Detail doplňkového zobrazení LCD	98
47	Komora v činnosti - po dosažení nastavené teploty	98

Seznam tabulek

1.1	Seebeckovy koeficienty vybraných materiálů	5
2.1	Parametry Peltierových modulů při teplotě horké strany 50 °C . . .	11
2.2	Pracovní body a příslušné předřadné rezistory indikačních LED . .	14
2.3	Styl zobrazení informací na LCD	24
3.1	Absolutní velikosti plechů pro výrobu jednotlivých dílů	39
3.2	Rozměry polystyrenových desek pro sestavení izolované komory . .	45
5.1	Seznam použitých cenově významných součástek	60
5.2	Seznam použitého cenově významného materiálu	60

Úvod

S objevem elektřiny, kdy na přelomu 18. a 19. století sestavil Alessandro Volta první stálý zdroj elektrického napětí, začaly probíhat další experimenty. Jednou ze zkoumaných oblastí byla také souvislost elektřiny a tepla. V následujících letech pak byly objeveny tři termoelektrické jevy. Jedním z nich je Peltierův jev, jehož podstatou je přeměna elektrické energie na tepelnou.

Praktické uplatnění Peltierova jevu umožnil až rozvoj polovodičů v druhé polovině 20. století. Díky tomu bylo možné sestrojít Peltierův článek na bázi polovodičových technologií, čímž se jeho účinnost dostala na přijatelnou hodnotu pro praktické využití. Vysvětlení fyzikální podstaty Peltierova článku v polovodičích se mimo jiné věnuje teoretický rozbor této práce.

Hlavním záměrem práce je návrh a následná výroba modelu teplotní komory, která využívá pro udržení požadované teploty Peltierovy moduly. Komora bude umožňovat chlazení i ohřev vnitřního izolovaného prostoru. Řízení celého systému bude zajišťovat mikrokontrolér. Napájení komory bude řešeno externím 12V zdrojem. Po realizaci komory budou změřeny její parametry, zejména pak přesnost regulace a také dosažitelné teploty v komoře. V závěru práce pak bude uvedena ekonomická rozvaha zabývající se analýzou nákladů na výrobu prototypu teplotní komory.

Kapitola 1

Teoretické základy a rozbor problematiky

1.1 Termoelektrické jevy

Základním principem termoelektrických jevů je přeměna elektrické energie na tepelnou a naopak tj. generace energie elektrické při existenci teplotního gradientu [1].

Vedení elektrického proudu v kovech je možné díky uspořádanému pohybu volných elektronů krystalovou mříží materiálu tvořenou jeho kladnými ionty. Elektrony nicméně nemohou samovolně vystoupit z kovového vodiče, protože u jeho povrchu vzniká Coulombova síla [2], kterou kladně nabitě ionty krystalové mříže stahují elektrony zpět do objemu materiálu. Aby mohl elektron opustit kov, musí překonat takto vzniklou potenciálovou bariéru. K překonání této bariéry musí elektron odevzdat určité množství energie, které odpovídá výstupní práci daného materiálu

$$W = q_e \cdot U_v, \quad (1.1)$$

kde q_e je náboj elektronu a U_v je velikost potenciálové bariéry [2].

Při spojení dvou kovů A a B s rozdílnou velikostí potenciálové bariéry (tj. s různou hodnotou výstupní práce) může samovolně docházet k vystupování elektronů z jednoho kovu a jejich vstupování do kovu druhého. První kov se tedy stává elektricky kladnějším oproti kovu druhému. Na jejich spojení vzniká kontaktní potenciál

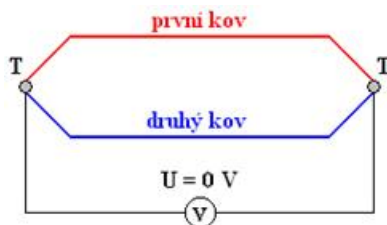
$$U_{AB} = U_{vA} - U_{vB}, \quad (1.2)$$

kde U_{vA} a U_{vB} jsou velikosti potenciálových bariér jednotlivých kovů. Vznik kontaktního potenciálu ve výsledku zabrání přecházení dalších elektronů z jednoho kovu do druhého, čímž dojde k ustálení do rovnovážného stavu [2].

Velikost kontaktního potenciálu je závislá na chemických vlastnostech obou kovů a také na teplotě jejich spoje. Na základě experimentů sestavil v 18. století italský fyzik Alessandro Volta řadu kovů podle jejich výstupní práce [3]: Al, Zn, Sn, Pb, Sb, Bi, Hg, Fe, Cu, Ag, Au, Pt, Pd. Z kovu s nižší výstupní prací (např. hliníku) po spojení s kovem s vyšší výstupní prací (např. platinou) přejdou elektrony do kovu s vyšší výstupní prací, čímž se kov s nižší výstupní prací nabije kladně, zatímco kov s vyšší výstupní prací se nabije záporně.

1.1.1 Seebeckův jev

Velikost kontaktního napětí je závislá také na teplotě. Spojíme-li dva kovy do elektrického obvodu a oba spoje kovů budou mít stejnou teplotu, budou i obě kontaktní napětí stejná [3]. Obvodem tak nebude procházet žádný proud, neboť se obě kontaktní napětí vzájemně vyruší, jak je znázorněno na obrázku 1.1.

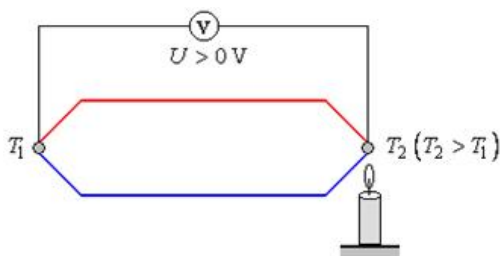


Obrázek 1.1: Dva spojené kovy se stejnou teplotou spoju [3]

Pokud jeden spoj zahřejeme na teplotu odlišnou od teploty druhého spoje (viz obrázek 1.2), budou i kontaktní napětí různá. V obvodu vznikne elektromotorické napětí [2], čímž obvodem začne protékat elektrický proud

$$I = \frac{U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1)}{R}, \quad (1.3)$$

kde $U_{12}(T_1)$ a $U_{12}(T_2)$ jsou jednotlivá kontaktní napětí při dané teplotě a R je celkový odpor kovů. Tento jev popsal v roce 1821 estonsko-německý fyzik Thomas Johann Seebeck [4], a tak se nazývá Seebeckův jev.



Obrázek 1.2: Princip Seebeckova jevu [4]

Při rozpojení obvodu rozdělením jednoho kovu na dvě části vznikne uspořádání zvané termočlánek, viz obrázek 1.3. Na jeho kontaktech lze měřit termoelektrické napětí [2], jehož hodnota je dána rozdílem kontaktních napětí jednotlivých spojů

$$\Delta U = U_{12}(T_2) - U_{12}(T_1). \quad (1.4)$$

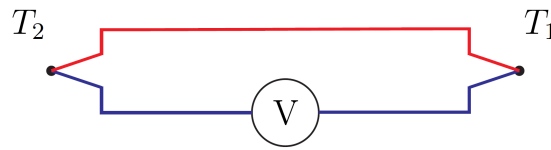
Pro hodnotu termoelektrického napětí platí dle [5] obecný vztah

$$\Delta U = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_1(T) - \alpha_2(T) dT, \quad (1.5)$$

kde α_1 resp. α_2 je Seebeckův koeficient příslušného kovu. Vztah (1.5) lze pro malé rozdíly teplot T_1 a T_2 linearizovat. Dle [4] pak platí

$$\Delta U = \alpha_{12} \cdot (T_2 - T_1) = \alpha_{12} \cdot \Delta T, \quad (1.6)$$

kde α_{12} je Seebeckův koeficient pro dané dva kovy či jiné použité materiály. Seebeckovy koeficienty některých prvků a jiných materiálů jsou uvedeny v tabulce 1.1.



Obrázek 1.3: Termočlánek [2]

Tabulka 1.1: Seebeckovy koeficienty vybraných materiálů [6]

kov	Seebeckův koeficient vztažený k platině [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]	polovodič	Seebeckův koeficient vztažený k platině [$\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$]
Sb (antimon)	47	Se (selen)	900
NiCr (nichrom)	25	Si (křemík)	440
Cd (kadmium)	7,5	Ge (germanium)	300
Au (zlato)	6,5	N-typ Bi_2Te_3	-230
Cu (měď)	6,5	P-typ Sb_2Te_3	185
Al (hliník)	3,5	$\text{SnBi}_3\text{Sb}_1\text{Te}_7$	151
Pt (platina)	0	PbTe	-180
K (draslík)	-9	$\text{Pb}_{03}\text{Ge}_{39}\text{Se}_{58}$	1670
Ni (nikl)	-15	$\text{Pb}_{06}\text{Ge}_{36}\text{Se}_{58}$	1410
Ko (konstantan)	-35	$\text{Pb}_{13}\text{Ge}_{29}\text{Se}_{58}$	-1710
Bi (bismut)	-72	$\text{Pb}_{15}\text{Ge}_{37}\text{Se}_{58}$	-1990

1.1.2 Peltierův jev

Komplementárním jevem k Seebeckovu jevu je jev Peltierův, který objevil v roce 1834 francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier. Připojíme-li k termočláncu znázorněnému na obrázku 1.3 místo voltmetru zdroj stejnosměrného napětí, přičemž oba konce termočláncu budou mít před připojením zdroje stejnou teplotu, začne se jeden spoj ohřívat a druhý ochlazovat nebo naopak dle směru procházejícího proudu [7] (viz obrázek 1.4). Pro generované teplo platí dle [8] vztah

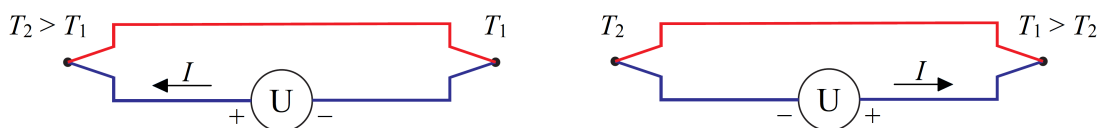
$$Q = (\Pi_1 - \Pi_2) \cdot I, \quad (1.7)$$

kde Π_1 a Π_2 jsou Peltierovy koeficienty jednotlivých kovů a I je velikost proudu procházejícího z prvního kovu do kovu druhého. Teplo generované procházejícím proudem působí proti Seebeckovu jevu, tj. má-li proud procházející spojem dvou kovů stejný směr jako proud způsobený Seebeckovým jevem při ohřátí spoje, bude se při Peltierovu jevu spoj ochlazovat [2] a naopak.

Vzhledem k tomu, že hodnota Peltierových koeficientů je úzce spjata s hodnotou Seebeckových koeficientů vztahem [8]

$$\Pi = T \cdot \alpha, \quad (1.8)$$

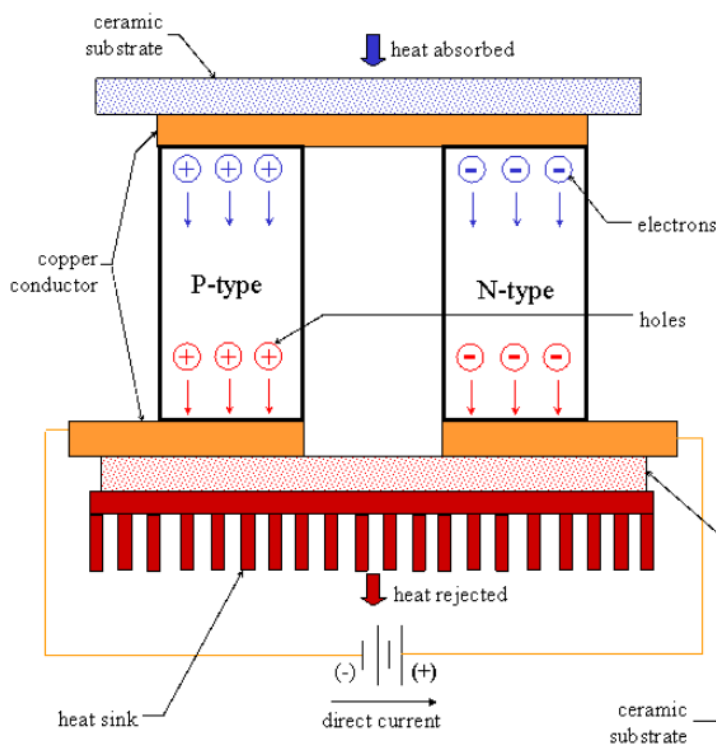
kde T je absolutní teplota, je zřejmé, že množství generovaného tepla a tudíž i teplotní rozdíl mezi oběma spoji bude vyšší u materiálů s více rozdílnými hodnotami Seebeckových koeficientů (viz tabulka 1.1).



Obrázek 1.4: Znázornění Peltierova jevu v termočlánku (kresleno dle [2] a [9])

1.2 Peltierův článek

Termoelektrické zařízení využívající Peltierova jevu je známé jako Peltierův článek. Vzhledem k poměrně malým hodnotám Seebeckových koeficientů u kovů (viz tabulka 1.1) se ke konstrukci Peltierových článků využívají polovodiče. Samotný článek je tvořen ze dvou silně dotovaných polovodičových sloupků, jedním typu P a druhým typu N, které jsou propojeny kovovým spojovacím můstkem. Druhé konce sloupků jsou pak opatřeny kontakty pro připojení článku do elektrického obvodu [10]. Sloupky tak jsou zapojeny elektricky do série, nicméně jejich uspořádání (viz obrázek 1.5) má za následek paralelní zapojení z hlediska toku tepelné energie [11]. Článek je dále opatřen keramickými destičkami, které slouží k odvodu tepla z článku do okolí resp. k absorpci tepla z okolí a jeho přivedení ke článku.



Obrázek 1.5: Peltierův článek [11]

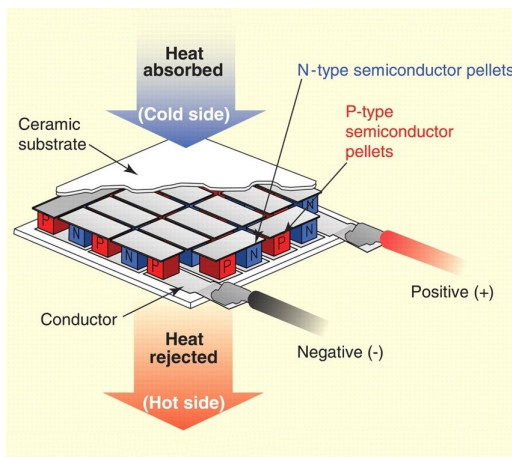
Při připojení Peltierova článku ke zdroji napětí s polaritou naznačenou na obrázku 1.5 začne článkem procházet elektrický proud, který je v jednotlivých částech článku tvořen majoritními nosiči náboje. Ve sloupku tvořeném polovodičem typu N dochází k toku záporně nabitých elektronů směrem ke kladnému pólu zdroje, zatímco v polovodiči typu P naopak k toku kladných děr k zápornému pólu zdroje [7]. Elektron, který se pohybuje ze záporného pólu zdroje, nejprve

doputuje ke sloupku typu P, kde snadno rekombinuje s dírou, čímž odevzdá část své energie ve formě tepla. Po průchodu sloupkem typu P musí elektron přejít na vyšší energetickou hladinu, aby mohl vstoupit do kovového spojovacího můstku, přičemž ve sloupku typu P po něm zůstane kladná díra. K tomu potřebuje získat dostatek energie, kterou přijme ve formě tepla. Pro následné přejití do sloupku typu N potřebuje elektron opět získat energii pro přechod na vyšší energetickou hladinu. Potřebné množství energie získá další absorpcí energie tepelné. Nakonec při opuštění sloupku typu N a přechodu do kovového kontaktu tuto získanou energii odevzdá ve formě tepla [11]. V důsledku výše popsaných procesů tak dochází k ochlazení Peltierova článku na straně spojovacího můstku a naopak k jeho zahřívání na straně kontaktů, čímž se článek navenek jeví jako tepelné čerpadlo.

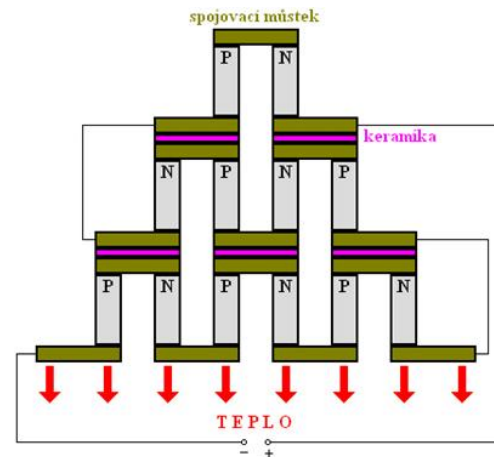
Pokud bychom obrátili polaritu zdroje, docházelo by v článku ke shodným procesům s tím, že tok proudu by byl opačný, a tak i jednotlivé výše popsané děje by probíhaly na opačných koncích sloupků. Díky tomu by se článek ochlazoval na straně kontaktů a naopak ohříval na straně spojovacího můstku.

1.2.1 Peltierův modul

Chladicí výkon samotného Peltierova článku je poměrně malý, stejně tak maximální teplotní rozdíl mezi studenou a teplou stranou se pohybuje okolo vyšších desítek stupňů Celsia [9]. Pro zvýšení chladicího výkonu jsou tak Peltierovy články spojovány do sériových kombinací. Jednotlivé elementy pak mohou být uspořádány do polí tj. řazeny paralelně z pohledu toku tepla, čímž vznikne tzv. Peltierův modul (viz obrázek 1.6) poskytující výrazně vyšší chladicí výkon oproti samotnému Peltierovu článku. Druhou možností je řazení článků do kaskády znázorněné na obrázku 1.7, což má za následek násobné zvýšení dosažitelného teplotního rozdílu mezi studenou a teplou stranou chladicího článku [7].



Obrázek 1.6: Peltierův modul [12]



Obrázek 1.7: Kaskádní Peltierův modul [7]

Pro konstrukci termoelektrického chladicího zařízení, je dobré znát elektrické charakteristiky Peltierových modulů uváděné v katalogových listech. Asi nejdůležitějším parametrem je chladicí výkon modulu Q_{\max} uváděný obvykle ve wattch a nejvyšší dosažitelný teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou článku ΔT_{\max} [13]. Vzhledem k tomu, že teplo generované Peltierovým článkem je úměrné proudu (1.7) a výkonové ztráty druhé mocnině proudu, dochází při zvyšování proudu Peltierovým modulem k poklesu chladicího výkonu. Proud, při kterém již nedochází

k dalšímu ochlazování studené strany článku, je označován jako I_{\max} [10]. Proud I_{\max} pak odpovídá maximální přípustné napětí U_{\max} , které lze přiložit na kontakty modulu [13].

1.2.2 Materiály pro konstrukci Peltierových článků

Využití Peltierových modulů v praktických aplikacích je však omezeno nízkou účinností přeměny elektrické energie na tepelnou [1]. Vlastnosti materiálů použitých pro výrobu Peltierova článku jsou zahrnuty v součinitel efektivity Z . Pro ideální článek jej lze vyjádřit vztahem [10]

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda}, \quad (1.9)$$

kde α je Seebeckův koeficient použitých polovodičových sloupek (tj. $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$), σ je měrná elektrická vodivost a λ měrná tepelná vodivost Peltierova článku. V praxi se ale setkáme spíše s bezrozměrnou materiálovou veličinou ZT [14], která je určena jako [1]

$$ZT = \frac{T \cdot \alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda}, \quad (1.10)$$

kde T je absolutní teplota. Pro zvýšení parametru ZT a tedy i vyšší efektivity termoelektrické přeměny energie je žádoucí, aby materiál použitý ke konstrukci Peltierova článku měl velký Seebeckův koeficient, malou tepelnou a naopak velkou elektrickou vodivost. Zmíněné parametry jsou ale vzájemně závislé, a tak běžně používané materiály v současné době dosahují hodnot ZT nejvýše kolem 1,5 až 1,8 [1].

Nejvyšší možná účinnost termoelektrických zařízení je dána tzv. Carnotovou účinností [14]. Účinnost současných Peltierových modulů se pohybuje okolo 10 % Carnotovy účinnosti, což přibližně odpovídá hodnotě $ZT = 1$. Oproti tomu kompresorové chladničky dosahují až 30 % Carnotovy účinnosti (ekvivalentní hodnotou pro Peltierův modul je $ZT = 4$) [14].

Pro výrobu Peltierových článků se aktuálně používají polovodičové materiály ze skupiny bizmut-telluridů, konkrétně sloučeniny Bi-Te-Se pro sloupky typu N a Bi-Sb-Te pro sloupky typu P [7]. Tyto materiály jsou ovšem tvořeny z toxických kovů, a proto jsou v současné době hledány nové netoxické materiály zejména na bázi oxidů [1]. Dále se také vědci snaží vyvinout materiály s vyšším ZT s využitím nanostruktur a vrstvením různým termoelektrických materiálů [14] [12]. Spojovací můstky jsou obvykle tvořeny měděnými pásky, ale je možné použít i jiných materiálů, které budou mít menší přechodový odpor na styku s polovodičovými sloupky [7].

1.3 Systémy řízení teploty využívající Peltierovy články

Relativně malá účinnost současných Peltierových článků je hlavním důvodem jejich malého rozšíření v komerčních produktech. Mezi oblastí, ve kterých se běžně využívají Peltierovy články, patří např. lékařství a různé vědecké aplikace, kde je hlavní výhodou použití Peltierových článků právě tichý a téměř bezúdržbový provoz [15]. Peltierovy moduly pak nacházejí uplatnění zejména k chlazení různých

elektronických přístrojů a také laserových diod či jiných vědeckých zařízení. V komerční sféře se lze setkat s Peltierovými moduly coby chladicími prvky přenosných chladniček, mrazicích boxů nebo ledniček pro automobily [15].

V současné době autoři různých prací, které se zabývají teplotními komorami s využitím Peltierových článků, řeší různé problémy týkající se zejména výkonové optimalizace chladicího systému. V práci [16] řeší její autoři nejvhodnější umístění Peltierových modulů v chladicí komoře, naopak autoři práce [17] použili předem dané uspořádání chladicí komory a jejich výzkum byl zaměřen spíše na způsob řízení a jeho dopad na rychlost dosažení cílové teploty. Na rychlost chlazení má také vliv typ použitého Peltierova modulu. Porovnáním efektivit jednoduššího a dvoustupňového Peltierova chladiče se zabývali autoři práce [18].

Záměrem některých prací je také výroba funkčního vzorku chladicí komory. Autoři práce [19] provedli celkový návrh teplotní komory, kterou následně realizovali. Vzhledem k tomu, že se jednalo pouze o prototyp, je provedení poněkud prostší o čemž vypovídá i použití plastového boxu coby teplotní komory. V práci [20] její autoři také zrealizovali teplotní komoru. Ke zhotovení chladicí komory ovšem použili běžně dostupného polystyrenového chladicího boxu, a tak i dosažené výsledky byly výrazně lepší. Záměrem práce [21] naopak bylo zjištění chladicího výkonu teplotní komory při použití různých poměrů chladicí kapaliny použité v chladiči Peltierova modulu. Teplotní komoru si však autoři vyrobili svépomocí, a tak tato práce poskytuje určitou představu pro návrh tloušťky izolačních stěn teplotní komory.

Ve výše uvedených pracích [19], [20], [21] a [17] použili jejich autoři pouze jeden Peltierův modul. Jinou možností je použití více menších Peltierových modulů, jako je tomu např. v práci [22], kde autoři provedli návrh přenosné solární ledničky. K jejímu chlazení bylo použito celkem deset menších Peltierových modulů, z nichž bylo pět umístěno na jedné a pět na druhé straně teplotní komory. Zmíněné uspořádání použili autoři zejména pro dosažení rovnoměrnějšího chlazení vnitřního prostoru ledničky.

Kromě chlazení lze Peltierovy moduly využít také k ohřevu. Bohužel na toto téma zatím nevzniklo mnoho prací. Jedním z mála projektů zabývajících se i ohřevem je práce [23], kde její autoři navrhli přenosný ohřívač vody kombinovaný s jejím ochlazovačem, který tak může sloužit jako automat na teplou a studenou vodu. Autoři práce [24] se naopak zabývali návrhem termoelektrického ohřívače vzduchu.

Výsledné řešení teplotní komory může být řízeno analogově s využitím diskrétních komparátorů a dalších integrovaných obvodů jako např. v práci [25]. Druhou možností je pak ovládání pomocí mikrokontroléru, na jehož piny jsou zapojeny příslušné senzory, ovládání Peltierových modulů a také indikace teploty pomocí displeje. Samotné řízení a chování systému je pak řešeno řídicím programem nahraným do mikrokontroléru. Tuto možnost zvolili mimo jiné i autoři prací [19], [23] a [17].

Kapitola 2

Návrh teplotní komory

Při návrhu systému teplotní komory bylo třeba vyřešit spoustu dílčích problémů. Zejména pak bylo třeba navrhnout systém řízení a samotné uspořádání výsledného zařízení s teplotní komorou. Dále bylo také nutné brát ohledy na zadání této práce, konkrétně pak určenou hodnotu napájecího napětí 12 V, maximální přípustný příkon 200 W a také na důraz na minimalizaci vnějších rozměrů komory při zachování požadovaného vnitřního objemu cca 2 dm³.

2.1 Termoelektrický chladicí systém

Pro chlazení teplotní komory jsem se na základě rešerše (viz kapitola 1.3) rozhodl použít dva Peltierovy moduly, které bude následně možné využít i k ohřevu komory. Umístění Peltierových modulů jsem zvolil dle závěrů práce [16] s ohledem na dosažení největšího chladicího výkonu. Moduly proto budou umístěny ve stěnách teplotní komory s tím, že jeden se bude nacházet na jedné straně komory a druhý symetricky na té protější. Zvolené uspořádání modulů vycházející z práce [22] zároveň přispěje k lepší distribuci chladu resp. tepla v komoře.

Po určení počtu a umístění Peltierových modulů bylo třeba určit jejich tepelný výkon Q_{\max} . Dle zadání práce by při zvolené konfiguraci bylo možné použít až cca 100W moduly. Takovou hodnotu výkonu je však již poměrně náročné uchladiť, a tak jsem po zvážení možností chlazení zvolil Peltierovy moduly s nominálním výkonem 60 W tj. s označením TEC1-12706. Mezní parametry použitých modulů včetně jejich rozměrů jsou uvedeny v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Parametry Peltierových modulů při teplotě horké strany 50 °C [26]

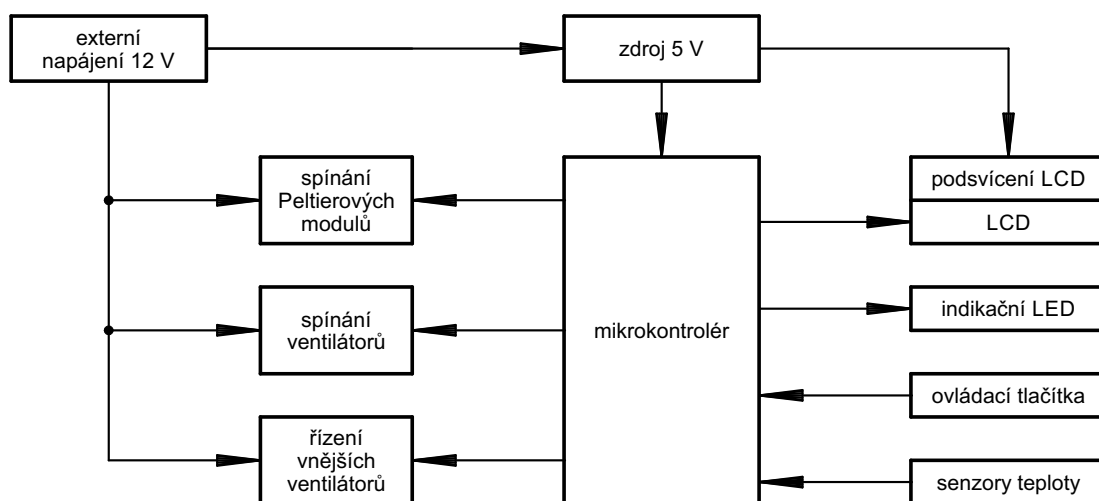
parametr	hodnota
Q_{\max} [W]	55
ΔT_{\max} [°C]	75
U_{\max} [V]	16
I_{\max} [A]	6
R_{modul} [Ω]	2,54
U_{\max} [V]	16
rozměry [mm]	40×40×3,6

Komora bude umožňovat jak chlazení coby hlavní činnost tak ohřev, který bude spíše doplňkovou vlastností. S ohledem na výše uvedené, je chlazení Peltie-

rových modulů uzpůsobeno k trvalému zatížení v režimu chlazení teplotní komory. Každý modul bude vybaven masivním žebrovaným chladičem na vnější straně, který bude ofukován 120mm ventilátorem. Druhá strana článků pak bude prodloužena pomocí měděného bloku skrz izolaci ke vnitřní stěně komory. V prostoru teplotní komory se pak bude nacházet menší žebrovaný chladič sloužící k absorpci tepla z komory resp. jeho odevzdání do komory. Vnitřní chladič bude dále doplněn ventilátorem o průměru 60 mm. Otáčky vnějších ventilátorů bude možno řídit dle aktuální potřeby chlazení vnější strany Peltierových modulů. Oproti tomu vnitřní ventilátory, které budou zároveň zajišťovat cirkulaci vzduchu v komoře, řízeny nebudou. Znázornění chladicí sestavy je součástí obrázku 2.13 v kapitole 2.3.

2.2 Systém řízení a ovládání komory

Další částí návrhu, na kterou jsem se zaměřil, bylo vytvoření blokového uspořádání řídicí elektroniky (viz obrázek 2.1). Vzhledem k problematickému analogovému řízení a případných dalších nepřesnostech například při nastavování teploty pomocí potenciometru jsem zvolil pro ovládání komory plně digitální řízení s využitím mikrokontroléru. Uživatelské rozhraní pak bude tvořeno výhradně tlačítkovými spínači, indikačními LED a LCD displejem.



Obrázek 2.1: Blokové schéma řídicího systému

Komora bude dle zadání napájena z externího stejnosměrného zdroje o napětí 12 V. Ten bude využit zejména k napájení Peltierových modulů a dále všech chladicích ventilátorů. Napětí 12 V bude využito také v obvodech řízení vnějších ventilátorů. Připojení napájení 12 V ke komoře bude řešeno pomocí autozásuvky doplněné o 16 A ochrannou pojistku pro případ tvrdého zkratu v elektronice komory. Komora bude dále doplněna hlavním vypínačem pro snadné zapnutí napájení. K napájení zbylé části elektroniky bude komora vybavena dedikovaným 5V zdrojem, ze kterého bude napájeno podsvícení LCD a také mikrokontrolér, který je vybaven integrovaným regulátorem napětí 3,3 V [27]. To bude následně využito k napájení jednotlivých periférií pro zajištění jejich kompatibility s 3,3V piny mikrokontroléru. Zdroj napětí 5 V bude tvořen spínaným zdrojem VR10S05, který pro svou správnou činnost vyžaduje pouze připojení dvou externích kondenzátorů [28], a tak na plošném spoji nebude zabírat mnoho místa. Spínaný zdroj pro napájení

elektroniky jsem zvolil zejména kvůli jeho minimálním výkonovým ztrátám při vyšších hodnotách výstupního proudu.

2.2.1 Tlačítka a indikační LED

Nastavení požadované teploty se bude provádět pomocí dvou tlačítek *Teplota +* a *Teplota -*, kterými se bude zvyšovat resp. snižovat požadovaná teplota o 1 °C. Vzhledem k tomu, že komora bude umožňovat jak chlazení tak ohřev, bude uživatelské rozhraní doplněno přepínačem režimu činnosti komory *Chlazení/Ohřev*. Pro lepší kontrolu nad funkcí komory bude sloužit spínač *Povolení činnosti komory* zapojený sériově se dvěma koncovými spínači indikujícími zavřené víko komory. Činnost komory tak nebude povolena jednak v případě otevření víka teplotní komory, jednak při rozepnutém spínači *Povolení činnosti komory*, kterým uživatel vyjádří svůj nesouhlas s uvedením komory do chodu. Posledním ovládacím prvkem bude tlačítka *Zobrazení LCD* sloužící k přepnutí zobrazených informací na displeji (viz kapitola 2.2.5 [Zobrazení informací na LCD](#)).

Všechna tlačítka budou pracovat s napětím 3,3 V a budou vybavena pull-down rezistorem, který zajistí úroveň logické 0 na pinu mikrokontroléru v případě, kdy bude tlačítka rozepnuto. Protože všechny spínače jsou mechanické, dochází při jejich stisknutí vždy k několika odskokům kontaktů před ustálením konečného stavu. Tento jev je však nežádoucí, protože by jedno fyzické stisknutí tlačítka bylo mikrokontrolérem vyhodnoceno jako vícero samostatných stisknutí. Pro odstranění dopadů zákmitů tlačítek na běh programu mikrokontroléru bude ke každému tlačítka připojen paralelně RC člunek [29]. Pokud bude vybíjecí časová konstanta RC člunku výrazně menší než nabíjecí časová konstanta, dojde při stisknutí tlačítka k rychlému vybití kondenzátoru, ale při krátkém odskoku tlačítka se kondenzátor nestihne dostatečně nabít, aby způsobil změnu logické úrovně na pinu mikrokontroléru. Výsledné zapojení tlačítek je znázorněno na obrázku 2.2. Pro časovou konstantu RC člunku platí vztah

$$\tau = R \cdot C, \quad (2.1)$$

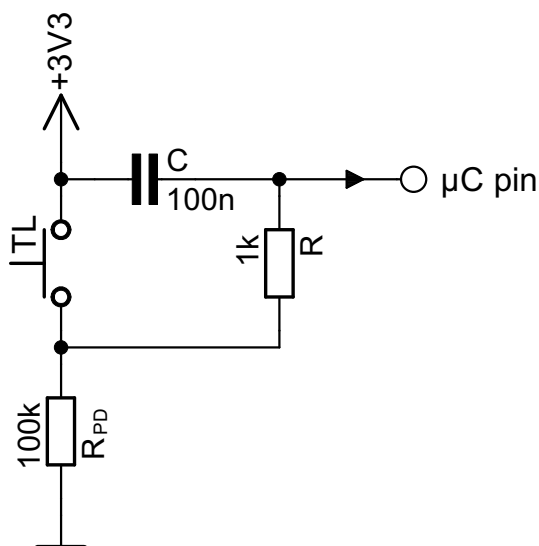
kde C je kapacita kondenzátoru a R je hodnota odporu, přes který se kondenzátor nabíjí resp. vybíjí. Hodnoty součástek použitých v zapojení dle obrázku 2.2 jsem experimentálně zvolil $R = 1 \text{ k}\Omega$, $C = 100 \text{ nF}$ a $R_{\text{PD}} = 100 \text{ k}\Omega$. Časové konstanty pak vycházejí

$$\tau_{\text{vybíjecí}} = R \cdot C = 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} = 0,1 \text{ ms} \quad (2.2)$$

a

$$\tau_{\text{nabíjecí}} = (R + R_{\text{PD}}) \cdot C = (10^3 + 100 \cdot 10^3) \cdot 100 \cdot 10^{-9} \doteq 10 \text{ ms}, \quad (2.3)$$

z čehož je zřejmé, že předpoklad výrazné rozdílnosti jednotlivých časových konstant je splněn.



Obrázek 2.2: Připojení tlačítek k mikrokontroléru

Uživatelské rozhraní teplotní komory bude také vybaveno celkem čtyřmi indikačními svítivými diodami. Barevně se bude jednat o dvě zelené, žlutou a červenou LED. Zelené LED budou dle běžných zvyklostí indikovat správný chod systému. Konkrétně jedna zelená LED bude signalizovat připojení napájení 12 V a druhá pak to, zda je momentálně komora v aktivním režimu chlazení nebo ohřevu (tj. že Peltierovy moduly jsou připojeny k napájení). Žlutá signalizační LED bude indikovat, zda je povolena činnost komory, tj. že jsou sepnuty jak oba koncové spínače, tak tlačítko *Povolení činnosti komory*. Tato LED bude napájena přímo přes tyto spínače, čímž dojde ke snížení potřebného počtu pinů mikrokontroléru. Nakonec červená LED bude svítit v případě, že došlo k překročení určených maximálních teplot Peltierových modulů.

Tabulka 2.2: Pracovní body a příslušné předřadné rezistory indikačních LED

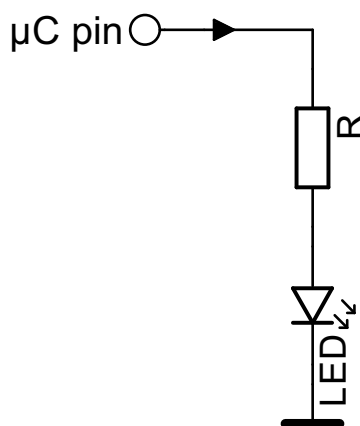
určení LED	barva LED	U_F [V]	I_F [mA]	U_{CC} [V]	R [k Ω]
indikace napájení 12 V	zelená	2,2	0,15	12	68
komora v činnosti	zelená	2,2	0,15	3,3	8,2
povolení činnosti komory	žlutá	1,8	1,1	3,3	1,5
překročení teploty	červená	1,7	0,6	3,3	2,7

Každá LED bude zapojena v sérii s předřadným rezistorem, který bude omezoval hodnotu jejího proudu (viz obrázek 2.3). Hodnota předřadného rezistoru se určí dle vztahu

$$R = \frac{U_{CC} - U_F}{I_F}, \quad (2.4)$$

kde U_{CC} je napájecí napětí dané diody a U_F resp. I_F je napětí resp. proud diody v pracovním bodě. Protože je žádoucí, aby všechny LED svítily stejně jasně, provedl jsem zkušební měření, při kterém jsem ke každé barvě LED připojoval různé hodnoty předřadných rezistorů tak, aby ve výsledku všechny barvy svítily subjektivně stejnou intenzitou. Výsledkem tohoto měření jsou pracovní body (tj. hodnoty U_F a I_F) jednotlivých barev svítivých diod, které pak byly použity k výpočtu příslušných předřadných rezistorů. Zmíněné hodnoty U_F , I_F a vypočtené

hodnoty předřadných odporů R včetně dalších doplňujících informací jsou uvedeny v tabulce 2.2.



Obrázek 2.3: Zapojení indikačních LED

2.2.2 Obvodové řešení spínání Peltierových modulů

Teplotní komora bude vybavena celkem dvěma termoelektrickými Peltierovými moduly, které bude možné použít pro její chlazení i ohřev. Vzhledem k tomu, že pro změnu režimu činnosti Peltierových modulů stačí pouze obrátit polaritu napájecího napětí, budou moduly zapojeny v můstku tvořeném čtyřmi unipolárními tranzistory, dvěma s kanálem N a dvěma s kanálem P. V jedné diagonále můstku bude připojeno napájecí napětí neměnné polarity, v druhé pak oba moduly zapojené vzájemně paralelně, jak je možno vidět v pravé části obrázku 2.4. Polarita napájení připojeného na Peltierovy moduly pak bude dána sepnutím příslušné dvojice protilehlých unipolárních tranzistorů tvořících můstek.

Sepnutí dané dvojice můstkových tranzistorů bude docíleno nastavením logické 1 na příslušném pinu mikrokontroléru, jejich rozepnutí pak nastane ve stavu logické 0. Mikrokontrolér nicméně pracuje s logickými úrovněmi 0 a 3,3 V, které nelze přímo využít ke spínání tranzistorů připojených na napájecí napětí 12 V. Na výstupním pinu mikrokontroléru je proto připojen invertor tvořený bipolárním tranzistorem T_1 typu NPN (viz obrázek 2.4), který převádí logickou úroveň 3,3 V na úroveň 12 V. Na bázi tranzistoru je přes bázevý rezistor R_B připojen výstupní pin mikrokontroléru, který je zároveň doplněn o pull-down rezistor R_{PD} pro zajištění úrovně 0 V v případě neaktivního výstupu. V kolektoru tranzistoru se pak nachází rezistor R_C , který tvoří zátěž tranzistoru a také nastavuje jeho pracovní bod. Hodnoty jednotlivých rezistorů je třeba volit tak, aby při nastavení úrovně výstupního pinu mikrokontroléru na logickou 0 resp. 1 o úrovni 3,3 V, bylo na kolektoru tranzistoru T_1 napětí, které odpovídá logické 1 resp. 0 o úrovni 12 V. Tomuto požadavku lze nejlépe vyhovět, pokud bude tranzistor T_1 v saturaci, tj. bude pracovat ve spínacím režimu, resp. se bude nacházet pouze ve stavech plně otevřen/plně uzavřen. Hodnota rezistoru R_{PD} nemá na výše uvedený požadavek vliv, a tak jsem ji volil obdobně jako v případě zapojení tlačítek, tj. $R_{PD} = 100 \text{ k}\Omega$. Rezistor R_C nicméně přímo ovlivňuje hodnotu bázevého rezistoru R_B . Hodnotu tohoto rezistoru jsem proto volil s ohledem na dosažení hodnoty kolektorového proudu tranzistoru T_1 v pracovním bodě cca 1 mA. Hodnota rezistoru

R_C tak bude 10 k Ω , čímž bude docíleno, aby kolektorový proud udržoval tranzistor otevřený, ale zároveň nezpůsoboval příliš velké výkonové ztráty na rezistoru R_C . Hodnota bázevého proudu ve stavu saturace by měla být přibližně 10 \times vyšší než hodnota proudu, která by odpovídala lineárnímu režimu tranzistoru, tj. pokud by platilo

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}, \quad (2.5)$$

kde I_B resp. I_C je bázevý resp. kolektorový proud tranzistoru v pracovním bodě a β je proudový zesilovací činitel tranzistoru v zapojení se společným emitorem. Pro bázevý rezistor R_B tedy platí

$$R_B = \frac{U_{\mu C} - U_{BE}}{I_{Bsat}} = \frac{U_{\mu C} - U_{BE}}{10 \cdot I_B} = \frac{U_{\mu C} - U_{BE}}{10 \cdot \frac{I_C}{\beta}} = \frac{U_{\mu C} - U_{BE}}{10 \cdot \frac{U_{CC} - U_{CEsat}}{\beta R_C}}, \quad (2.6)$$

kde $U_{\mu C}$ je výstupní napětí mikrokontroléru (tj. 3,3 V), U_{BE} je napětí báze-emitore tranzistoru (tj. cca 0,65 V), I_{Bsat} je požadovaný bázevý proud pro dosažení saturace a U_{CEsat} je napětí kolektor-emitore tranzistoru ve stavu saturace (tj. cca 0,2 V). Jako tranzistor T_1 jsem použil standardní bipolární tranzistor BC337-40, u něhož výrobce udává hodnotu proudového zesilovacího činitele β přibližně 400 [30]. Po dosažení všech výše uvedených hodnot do vztahu (2.6) a zaokrouhlení vypočítané hodnoty dle dostupných hodnot rezistorů řady E12 jsem hodnotu bázevého rezistoru zvolil 100 k Ω .

Signálem z kolektoru tranzistoru T_1 je pak přímo spínán příslušný můstkový tranzistor s kanálem P. Pro spínání unipolárního tranzistoru s kanálem N zapojeného v druhé větvi můstku je však potřeba přesně opačných úrovní než pro spínání unipolárního tranzistoru s kanálem P. K tomuto účelu je výstup z kolektoru tranzistoru T_1 ještě zapojen na vstup invertoru tvořeného dvěma unipolárními tranzistory T_2 a T_3 , jedním s kanálem N a jedním s kanálem P. Výstup invertoru pak spíná příslušný můstkový tranzistor s kanálem N.

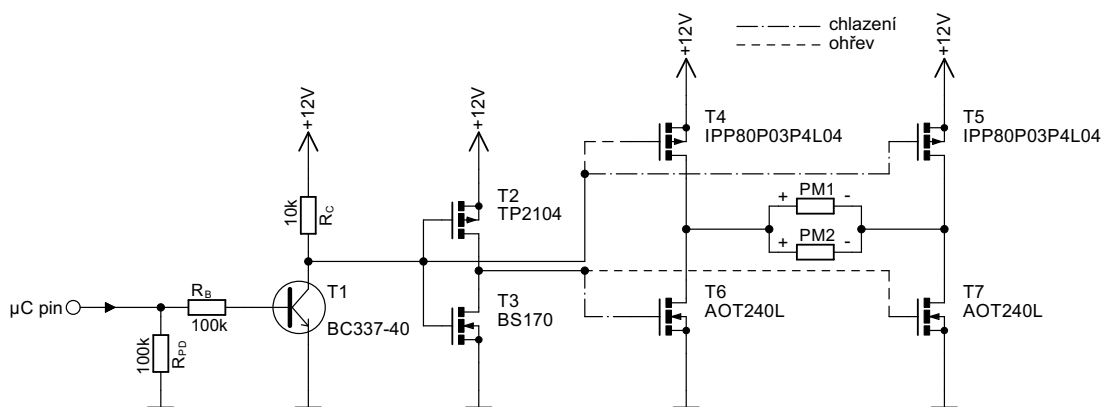
Výše popsaný spínací obvod, tvořený bipolárním tranzistorem T_1 spolu s odpory nastavujícími jeho pracovní bod a invertorem tvořeným unipolárními tranzistory T_2 a T_3 , je ve výsledném zapojení použit dvakrát, jednou pro spínání Peltierových modulů v režimu chlazení a jednou v režimu ohřevu. Spínací můstek je však pouze jeden. Výstupy obou spínacích obvodů jsou připojeny na příslušná hradla protilehlých můstkových tranzistorů, jak je znázorněno na obrázku 2.4.

Typy unipolárních tranzistorů tvořících invertor, který není nikterak výkonově namáhán, jsem vybral s ohledem na úsporu místa na budoucím plošném spoji z nabídky tranzistorů s pouzdem TO92. Označení tranzistoru T_2 je tak TP2104 [31] a tranzistoru T_3 BS170 [32]. Pro konstrukci můstku však bylo nutné použít výkonové tranzistory, neboť velikost spínaných proudů bude cca 10 A. Důležitým parametrem výkonových unipolárních tranzistorů je odpor kanálu v sepnutém stavu R_{DSon} . Ztrátový výkon vzniklý na tranzistoru je pak přímo úměrný hodnotě tohoto parametru, neboť platí

$$P_Z = R_{DSon} \cdot I_D^2, \quad (2.7)$$

kde I_D je proud tekoucí tranzistorem. Při proudu $I_D = 10$ A bude ztrátový výkon roven stonásobku hodnoty R_{DSon} . Vzhledem k tomu, že většina běžných tranzistorů pro spínání proudů nad 10 A dosahuje hodnot R_{DSon} okolo 20 m Ω , vznikal by na každém tranzistoru ztrátový výkon cca 2 W, který by bylo nutné uchladiť.

S ohledem na minimalizaci vnějších rozměrů teplotní komory jsem tyto tranzistory proudově předdimenzoval za účelem dosažení co nejmenší hodnoty parametru R_{DSon} . Typové označení můstkových tranzistorů s kanálem P je IPP80P03P4L04 [33] a tranzistorů s kanálem N AOT240L [34]. Oba dva použité typy tranzistorů mají hodnotu R_{DSon} okolo $5\text{ m}\Omega$, takže pro uchlazení ztrátového výkonu, který na každém tranzistoru bude mít hodnotu cca $0,5\text{ W}$, budou postačovat velmi malé chladiče.



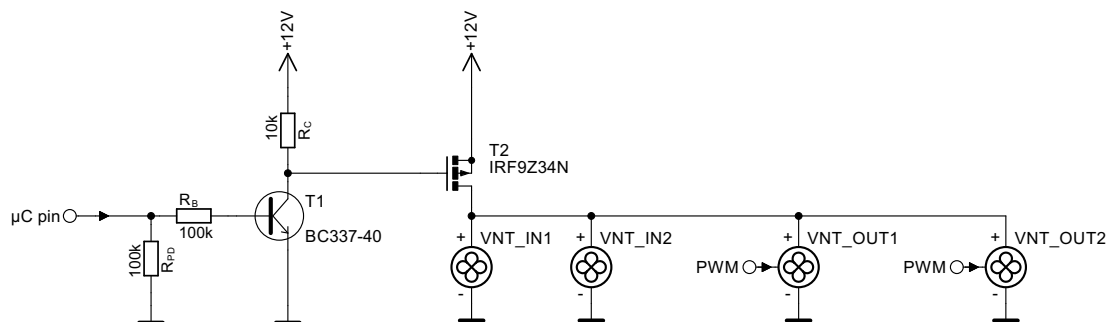
Obrázek 2.4: Zapojení pro spínání Peltierových modulů

2.2.3 Spínací a řídicí obvod ventilátorů

Pro chlazení Peltierových modulů jsou použity celkem čtyři ventilátory. Ty budou v činnosti, pouze pokud to bude potřeba, čímž bude dosaženo určité úspory spotřebované energie a také snížení hlučnosti teplotní komory ve stavu nečinnosti prakticky na nulu.

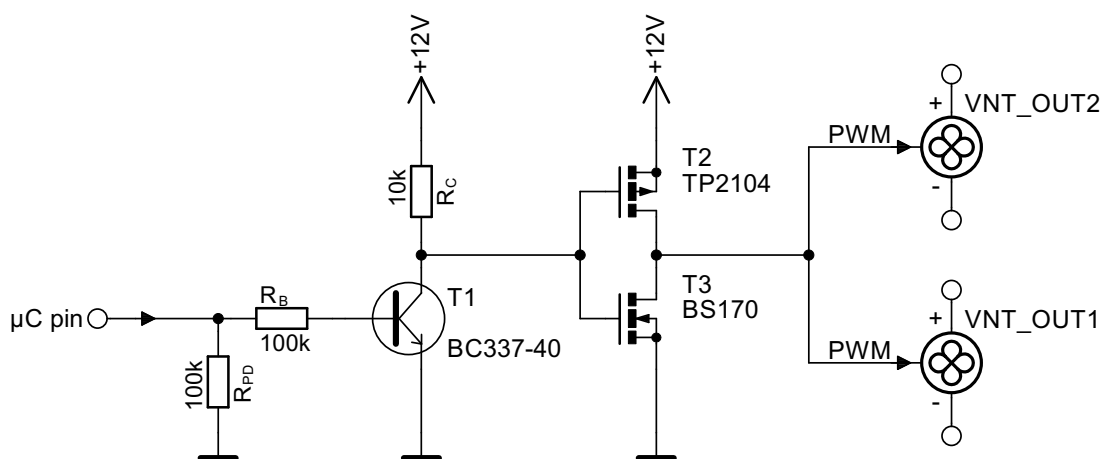
Všechny ventilátory budou spínány současně pomocí jednoho spínacího obvodu. Ten v mnohém vychází ze zapojení spínacího obvodu pro Peltierovy moduly. Analogicky je nejprve potřeba převést $3,3\text{V}$ logické úrovně mikrokontroléru na 12V úrovně použitelné pro spínání unipolárních tranzistorů. K tomu slouží naprosto identický invertor s bipolárním tranzistorem, zapojený na výstupní pin mikrokontroléru. Ventilátory však stačí připínat pouze na napájecí napětí jedné polaroty, a tak není potřeba užít můstkového zapojení, jako v případě spínání Peltierových modulů. Pro spínání ventilátorů je tak použit jediný unipolární tranzistor s kanálem P, který tak lze spínat přímo signálem z kolektoru bipolárního tranzistoru připojeným na jeho hradlo (viz obrázek 2.5). Spínaný proud je také podstatně menší než u Peltierových modulů, a tak lze využít standardní typ výkonového unipolárního tranzistoru s vyšší hodnotou parametru R_{DSon} . Použitý typ tranzistoru má označení IRF9Z34N a odpor kanálu v sepnutém stavu dosahuje hodnoty $0,1\ \Omega$ [35]. Vzhledem k tomu, že spínaný proud bude mít za předpokladu maximálních otáček všech ventilátorů hodnotu jenom okolo $0,4\text{ A}$ ¹, bude i vznikající ztrátový výkon na tranzistoru velmi malý, a tak doplňkové chlazení tranzistoru hliníkovým chladičem vůbec nebude potřeba.

¹vnitřní ventilátory mají nominální hodnotu proudu maximálně 56 mA [36], vnější ventilátory mohou dosahovat proudu až 120 mA [37]



Obrázek 2.5: Spínací obvod ventilátorů

Použitý typ vnějších ventilátorů umožňuje regulaci jejich otáček pomocí PWM signálu přivedeného na jejich řídicí vstup [38]. PWM signál generovaný prostřednictvím mikrokontroléru však také využívá napětí 3,3 V coby úroveň logické 1. Z tohoto důvodu je na výstupní pin mikrokontroléru generující řídicí signál připojen invertor pro převod 3,3V logiky na 12V logiku shodný se vstupní částí spínacích obvodů pro ventilátory a Peltierovy moduly. Převodní invertor sice přizpůsobí logické úrovně pro řízení ventilátorů, ale také změní povahu řídicího signálu, kdy 100 % PWM převede na 0 % PWM a naopak. Pro zajištění stavu, kdy 100 % PWM na výstupu mikrokontroléru odpovídá 100 % PWM na řídicím pinu ventilátorů je tak na kolektor bipolárního tranzistoru zapojen další invertor, z jehož výstupu jsou teprve řízeny ventilátory, jak je znázorněno na obrázku 2.6. Druhý invertor je tvořen dvěma unipolárními tranzistory a je shodný s invertorem použitým v obvodech spínání Peltierových modulů.



Obrázek 2.6: Propojení řídicího pinu ventilátorů s mikrokontrolérem

2.2.4 Senzory teploty a jejich zapojení

V systému teplotní komory se bude nacházet celkem pět samostatných senzorů teploty. Jeden hlavní senzor bude sloužit k vyhodnocování aktuální teploty v izolované komoře. Zbylé čtyři senzory pak budou kontrolovat teplotu Peltierových modulů. Tyto senzory jsem do návrhu zahrnul zejména proto, že v rámci řešení (viz kapitola 1.3) jsem nenašel prakticky žádnou práci zabývající se ohřevem s využitím Peltierových modulů. Druhým důvodem, který mě vedl k využití těchto

senzorů, byl fakt, že chladicí sestavy jsem navrhnul optimalizované pro chlazení (viz kapitola 2.1). Nicméně komora bude umožňovat i ohřev, takže existuje reálné nebezpečí přehřátí Peltierových modulů způsobené nedostatečným odvodem tepla do prostoru teplotní komory. Údaje senzorů teploty Peltierových modulů tak budou sloužit zejména k vyhodnocení, zda nedošlo k jejich přehřátí.

2.2.4.1 Senzor teploty v komoře

Pro měření teploty v komoře jsem chtěl použít senzor, který by vykazoval nepřesnost změřené teploty menší než 1 °C. Tento požadavek jsem zvolil s ohledem na řídicí systém, který bude umožňovat nastavení teploty v komoře právě s rozlišením 1 °C. Protože analogové teplotní senzory vykazují relativně velkou nepřesnost v řádu nižších jednotek stupňů Celsia [39], rozhodl jsem se pro volbu číslicového senzoru, který bude poskytovat lepší přesnost určení teploty. Číslicové senzory jsou obvykle vybaveny určitým typem komunikační sběrnice, který je pak nutné adekvátně propojit s mikrokontrolérem. Následně je třeba se senzorem komunikovat a získat tak údaj o teplotě. Tento způsob se mi zdál poněkud komplikovaný, protože by bylo třeba senzor určitým způsobem inicializovat a mimo jiné by bylo zapotřebí více pinů mikrokontroléru pro jeho připojení. Z výše uvedených důvodů jsem proto pro měření teploty v komoře použil přesný číslicový senzor SMT172 s PWM výstupem [40]. Senzor tak není třeba nijak inicializovat a pro jeho připojení k mikrokontroléru stačí jediný pin. Další výhodou tohoto senzoru je schopnost měřit i záporné teploty, kterých by bylo potenciálně možné dosáhnout uvnitř teplotní komory.

Údaj o hodnotě teploty měřené senzorem SMT172 je reprezentován střídou výstupního PWM signálu, pro kterou dle katalogového listu [40] platí vztah

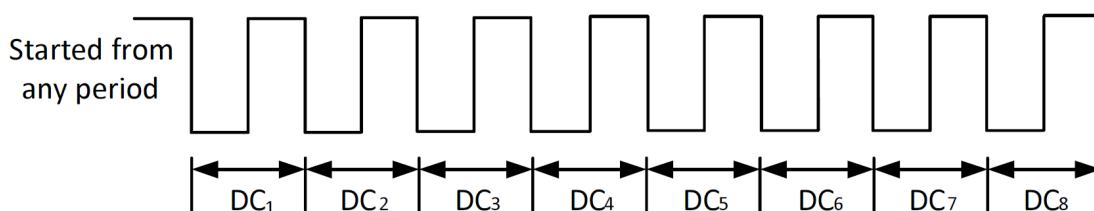
$$DC = 0,32 + 0,0047 \cdot T, \quad (2.8)$$

kde T je měřená teplota vyjádřená ve stupních Celsia a DC je platná hodnota střídy. Ze vztahu (2.8) lze snadno vyjádřit měřenou teplotu jako

$$T = \frac{DC - 0,32}{0,0047} = 212,77 \cdot DC - 68,085 \quad (2.9)$$

s tím, že výsledná hodnota teploty má v celém rozsahu měřitelných teplot nepřesnost maximálně 0,8 °C [40]. Pro přesnější určení teploty lze využít rovnici druhého řádu, která koriguje typickou chybovou křivku v krajních částech teplotního rozsahu senzoru. Vztah pro určení teploty s nepřesností pouze 0,1 °C v rozsahu teplot -20 °C až 80 °C pak dle [40] je

$$T = -1,43 \cdot T^2 + 214,56 \cdot T - 68,6. \quad (2.10)$$



Obrázek 2.7: Způsob vyhodnocení platné hodnoty střídy [40]

Číslicový senzor SMT172 bude napájen napětím 3,3 V přes mikrokontrolér, čímž bude zajištěna správná úroveň logické 1 ve výstupním PWM signálu pro vyhodnocení pomocí mikrokontroléru. Pro výpočet měřené teploty bude využit přesnější vztah (2.10), jehož vstupním parametrem je změřená platná hodnota střídý. Pro její získání je dle výrobce [27] třeba změřit osm stříd po sobě jdoucích pulzů PWM signálu, kde první pulz začíná sestupnou hranou, jak je znázorněno na obrázku 2.7. Platná hodnota střídý DC je pak aritmetickým průměrem získaných jednotlivých stříd, tj. platí pro ni vztah

$$DC = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 DC_i, \quad (2.11)$$

kde DC_i jsou jednotlivé změřené hodnoty stříd, pro které platí

$$DC_i = \frac{T_H}{T_H + T_L}, \quad (2.12)$$

kde T_H je doba trvání pulzu v logické 1 a T_L je doba trvání pulzu v logické 0.

Bohužel z testovacího programu pro vyhodnocení teploty ze senzoru výše popsaným způsobem vyšlo najevo, že vyhodnocování každé střídý zvláště vnáší poměrně výraznou chybu do určení výsledné teploty. Pravděpodobným důvodem tohoto zjištění je fakt, že PWM signál ze senzoru může mít frekvenci až 7 kHz [40]. Mikrokontrolér pak nejspíše nebyl schopný provádět výpočty v plovoucí řádové čarce (nutných pro výpočet střídý) s dostatečnou přesností při rychlých změnách PWM signálu na jeho vstupním pinu. Proto jsem pro vyhodnocení měřené teploty implementoval vlastní algoritmus, který pro určení platné hodnoty střídý využívá znalost celkové doby trvání PWM signálu v logické 1 a logické 0 po dobu měření, tj. osmi po sobě jdoucích PWM pulzech. Platná hodnota střídý je pak dána jako

$$DC = \frac{T_{Hcelk}}{T_{Hcelk} + T_{Lcelk}}, \quad (2.13)$$

kde T_{Hcelk} resp. T_{Lcelk} je celková doba trvání signálu v logické 1 resp. logické 0. Pro hodnoty T_{Hcelk} a T_{Lcelk} pak platí

$$T_{Hcelk} = \sum_{i=1}^n T_{Hi} \quad (2.14)$$

a

$$T_{Lcelk} = \sum_{i=1}^n T_{Li}, \quad (2.15)$$

kde T_{Hi} resp. T_{Li} jsou doby trvání jednotlivých PWM pulzů v logické 1 resp. logické 0 a n je počet změřených PWM pulzů.

Výsledky získané s pomocí algoritmu (2.13) již byly o poznání lepší, neboť vyhodnocená teplota přibližně odpovídala očekávané okolní teplotě. Nicméně stále docházelo ke kolísání jednotlivých po sobě jdoucích výsledných hodnot teploty i o několik stupňů Celsia. Důvodem této nepřesnosti je tzv. vzorkovací šum, který je zmíněn v katalogovém listu senzoru [40]. Řešením je dle výrobce provést měření (2.11) z více než osmi stříd po sobě jdoucích PWM pulzů, kde počet pulzů je libovolným násobkem osmi. Do algoritmu vyhodnocení teploty (2.13) jsem tedy implementoval delší interval měření využívající různých násobků základního intervalu osmi stříd. Na základě získaných výsledků jsem zvolil ve finální verzi řídicího

programu měření využívající 256 po sobě jdoucích pulzů PWM signálu ze senzoru. Zvolená hodnota poskytuje dostatečně stabilní vyhodnocení teploty při stálé teplotě okolí a také doba získání aktuální hodnoty teploty dosahuje pouze vyšších desítek milisekund.

2.2.4.2 Senzory teploty Peltierových modulů

Na rozdíl od senzoru teploty v komoře, u kterého jsem požadoval poměrně velkou přesnost, jsem se při volbě senzorů měřících teploty stran Peltierových modulů spokojil s méně přesnými senzory. Užití přesných senzorů by zde nemělo příliš velký význam, neboť měřené teploty (přesněji vyhodnocovaný teplotní rozdíl) jsou v řádu vyšších desítek stupňů Celsia. Dále jsou také potřeba celkem čtyři senzory, což by při užití dražších číslicových senzorů zbytečně navýšilo cenu výsledného modelu teplotní komory. Volba tak padla na výběr vhodného typu analogového teplotního senzoru, který by umožňoval měřit teploty v rozsahu cca -20 až 80 °C coby předpokládaných maximálních teplot Peltierových modulů. Z dostupné nabídky senzorů jsem nakonec zvolil senzor LM19 poskytující základní přesnost $2,5$ °C [39].

Senzor bude napájen napětím $3,3$ V jako všechny periferie připojené k mikrokontroléru. Převodní konstanta senzoru je záporná, což v praxi znamená, že s rostoucí teplotou klesá hodnota výstupního napětí. Pro výstupní napětí platí dle výrobce [39] přesný vztah

$$U_{\text{out}} = -3,88 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 1,15 \cdot 10^{-2} \cdot T + 1,8639, \quad (2.16)$$

kde T je měřená teplota ve stupních Celsia. Pro vyhodnocení teploty řídicím programem mikrokontroléru jsem však použil linearizovaného průběhu převodní závislosti senzoru pro rozsah teploty od -10 °C do 65 °C. Výstupní napětí je pak dáno rovnicí [39]

$$U_{\text{out}} = -11,71 \cdot 10^{-3} \cdot T + 1,8641. \quad (2.17)$$

Ze vztahu (2.17) lze snadno vyjádřit měřenou teplotu jako

$$T = \frac{U_{\text{out}} - 1,8641}{-11,71 \cdot 10^{-3}}. \quad (2.18)$$

Výstupní napětí senzoru v uvažovaném rozsahu měřených teplot -20 až 80 °C bude nabývat hodnot z intervalu přibližně $0,9$ až $2,1$ V. Vzhledem k tomu, že A/D převodník mikrokontroléru pracuje s referenčním napětím $3,3$ V, jsem se rozhodl využít předzesilovač výstupního napětí senzoru pro využití maximálního rozsahu A/D převodníku. Pro zesílení signálu ze senzoru bude využit operační zesilovač v neinvertujícím zapojení (viz obrázek 2.8). Zesílení operačního zesilovače je dáno velikostí odporů zapojených ve zpětné vazbě. Pro neinvertující zapojení platí známý vztah

$$A_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.19)$$

kde R_1 a R_2 jsou hodnoty odporů příslušných rezistorů dle schématu na obrázku 2.8. Požadované zesílení operačního zesilovače lze také vyjádřit jako

$$A_u = \frac{U_{\text{AD}_{\text{max}}}}{U_{\text{out}_{\text{max}}}}, \quad (2.20)$$

kde $U_{\text{out}_{\text{max}}}$ maximální výstupní napětí ze senzoru a $U_{\text{AD}_{\text{max}}}$ je maximálním napětím A/D převodníku mikrokontroléru. Po dosažení výše uvedených hodnot napětí

získáme ideální hodnotu zesílení operačního zesilovače přibližně $A_u = 1,57$. Pokud ze vztahu (2.19) vyjádříme poměr hodnot rezistorů ze znalosti hodnoty A_u jako

$$R_2 = R_1 \cdot (A_u - 1) \quad (2.21)$$

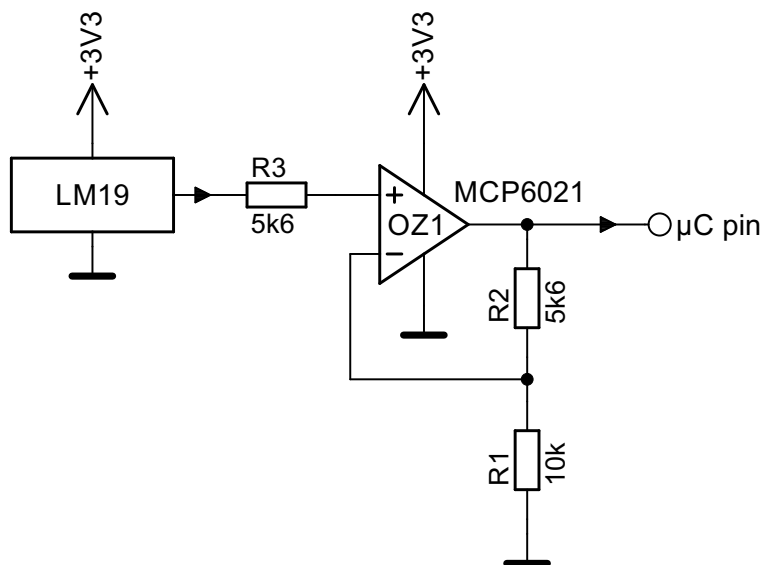
a zvolíme hodnotu rezistoru $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, vyjde hodnota rezistoru $R_2 = 5,7 \text{ k}\Omega$. Taková hodnota však není součástí standardní řady hodnot E12, ve které se rezistory běžně vyrábí. Při použití standardizované hodnoty $R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$ dojde ke změně zesílení neinvertujícího zapojení operačního zesilovače dle vztahu (2.19) na hodnotu $A_u = 1,56$. Upravená hodnota zesílení je mírně nižší než původně požadovaná, a tak při maximální hodnotě výstupního napětí senzoru nedojde k přetečení A/D převodníku mikrokontroléru.

Užitím operačního předzesilovače však pozbývá platnosti vztah pro určení teploty (2.18), neboť napětí na vstupu A/D převodníku mikrokontroléru je odlišné od výstupního napětí senzoru. Proto je třeba v algoritmu vyhodnocení teploty vzít v úvahu výsledné zesílení předzesilovače A_u . Pro určení hodnoty teploty měřené senzorem je tak v řídicím programu využít vztah

$$T = \frac{\frac{U_{AD}}{A_u} - 1,8641}{-11,71 \cdot 10^{-3}} = \frac{\frac{U_{AD}}{1,56} - 1,8641}{-11,71 \cdot 10^{-3}}, \quad (2.22)$$

kde U_{AD} je napětí vyhodnocené A/D převodníkem mikrokontroléru. Dále je obdobně jako u číslicového senzoru využito průměrování z vícera samostatných měření. Pro dosažení příliš nekolísající hodnoty teploty jsem nakonec využil průměrování s využitím 4 po sobě jdoucích měření s tím, že jednotlivá měření jsou prováděna v intervalu 10 ms.

Operační zesilovače ovšem vykazují určité negativní vlastnosti. Vliv na přesnost měření teploty mají zejména statické chyby zesilovače, konkrétně vstupní napěťová nesymetrie a vstupní klidové proudy. Ty vnášejí statickou chybu do výstupního napětí zesilovače, čímž by docházelo k systematické chybě při vyhodnocení teploty mikrokontrolérem. Vliv vstupních klidových proudů zesilovače lze snadno potlačit mírnou úpravou obvodu. K tomuto účelu slouží rezistor R_3 (viz schéma zapojení na obrázku 2.8), jehož hodnota je shodná s rezistorem R_2 .



Obrázek 2.8: Zapojení analogových teplotních senzorů

Vstupní napětovou nesymetrii bohužel nelze omezit změnou obvodového zapojení. Vzhledem k tomu, že teplotní senzory samotné mají již poměrně velkou nepřesnost, jsem se rozhodl, že kritériem pro přípustnou hodnotu vstupní napětové nesymetrie použitého zesilovače bude jím zapříčiněná změna výstupního napětí, která způsobí změnu výstupu A/D převodníku mikrokontroléru o 1 bit. Použitý mikrokontrolér (viz kapitola 2.2.6) je vybaven A/D převodníkem s rozlišením 12 bitů [41]. Hodnota napětí, která odpovídá nejméně významnému tzv. LSB bitu, je dána vztahem [42]

$$u_{\text{LSB}} = \frac{U_{\text{AD}_{\text{max}}}}{2^n}, \quad (2.23)$$

kde n je počet bitů A/D převodníku. Výstupní napětí operačního zesilovače je za předpokladu nulového vstupního napětí a uvažování pouze vlivu vstupní napětové nesymetrie dáno vztahem [42]

$$U_{\text{OZ}_{\text{out}}} = U_{\text{os}} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = U_{\text{os}} \cdot A_u, \quad (2.24)$$

kde U_{os} je hodnota vstupní napětové nesymetrie operačního zesilovače. Pro splnění výše uvedeného požadavku je pak nutné, aby hodnota výstupního napětí operačního zesilovače dle vztahu (2.24) byla menší nebo rovna hodnotě napětí neméně významného bitu (2.23), tj. aby platilo

$$U_{\text{OZ}_{\text{out}}} = U_{\text{os}} \cdot A_u \leq u_{\text{LSB}} = \frac{U_{\text{AD}_{\text{max}}}}{2^n}. \quad (2.25)$$

Ze vztahu (2.25) lze pak odvodit podmínku pro maximální přípustnou velikost vstupní napětové nesymetrie

$$U_{\text{os}} \leq \frac{u_{\text{LSB}}}{A_u} = \frac{U_{\text{AD}_{\text{max}}}}{2^n \cdot A_u}. \quad (2.26)$$

Po dosazení odpovídajících hodnot do vztahu (2.26) dostaneme výsledek, že vstupní napětová nesymetrie použitého operačního zesilovače může mít hodnotu maximálně cca 500 μV .

Dalším problémem operačních zesilovačů je existence tzv. saturačního napětí. To má za následek, že výstup běžných operačních zesilovačů nemůže dosáhnout hodnoty napájecího napětí, ale pouze hodnoty o jeden až dva volty nižší. Tento problém odstraňují tzv. rail-to-rail operační zesilovače, které mají hodnotu saturačního napětí pouze v řádu jednotek případně nižších desítek milivoltů [43]. Operační zesilovač v zapojení dle obrázku 2.8 je připojen na nesymetrické napájení, které je tvořeno napětím 3,3 V z mikrokontroléru a zemním potenciálem 0 V. Proto jsem při volbě vhodného operačního zesilovače musel zohlednit jednak hodnotu vstupní napětové nesymetrie, která by měla být nižší než 500 μV , jednak požadavek na rail-to-rail výstup zesilovače. Z dostupných operačních zesilovačů, které vyhovovaly oběma podmínkám, jsem zvolil typ MCP6021 [43].

2.2.5 Zobrazení informací na LCD

Pro informování uživatele o aktuálním stavu komory bude kromě indikačních LED využít také displej. Na něm se budou zobrazovat informace o jednotlivých teplotách systému, jednak nastavených, jednak aktuálně měřených pomocí senzorů.

S ohledem na požadované množství a typ zobrazovaných informací bude použit dvouřádkový alfanumerický LCD displej. Počet potřebných znaků na řádek jsem následně určil dle stylu zobrazení informací, který jsem navrhl s důrazem na jejich srozumitelnost a snadnou čitelnost displeje. V základním zobrazení bude displej zobrazovat nastavenou teplotu v komoře a také aktuálně měřenou hodnotu této teploty. S ohledem na přesnost senzoru bude údaj teploty v komoře zobrazován s rozlišením na jedno desetinné místo. Hodnota nastavené teploty pak bude zobrazována s rozlišením 1 °C, což odpovídá kroku nastavení teploty pomocí tlačítek. Protože bude komora vybavena také čtyřmi senzory kontrolujícími teplotu Peltierovým modulů, bude možné přepnout zobrazení displeje ze základního na doplňkové pomocí tlačítka *Zobrazení LCD*. V doplňkovém zobrazení pak bude uživatel informován o teplotách vnitřních a vnějších stran Peltierových modulů. Vzhledem k nižší přesnosti senzorů teploty Peltierových modulů budou údaje o jejich teplotě zobrazeny s rozlišením 1 °C. Teplota dané strany jednoho a druhého Peltierova modulu pak bude oddělena lomítkem. Výslednou podobu zobrazených informací je možné vidět v tabulce 2.3, kde jsou také uvedeny upravené styly zobrazení v případě záporných hodnot jednotlivých teplot. Výsledný návrh zobrazení obsahuje maximálně 24 znaků na řádek, a tak bude použit LCD umožňující zobrazit 24×2 znaky.

Tabulka 2.3: Styl zobrazení informací na LCD

zobrazení	kladné hodnoty teplot	záporné hodnoty teplot
základní	Aktuální teplota: xx.x°C Nastavená teplota: xx°C	Aktuální teplota: -xx.x°C Nastavená teplota: -xx°C
doplňkové	Vnitřní strana: xx/xx°C Vnější strana: xx/xx°C	Vnitřní strana: -xx/-xx°C Vnější strana: -xx/-xx°C

Displej bude připojen k mikrokontroléru, jehož výstupní piny využívají pro vyjádření úrovně logické 1 hodnotu napětí 3,3 V. Z tohoto důvodu bylo nutné vybrat displej, jehož komunikační rozhraní by bylo kompatibilní s 3,3V úrovněmi mikrokontroléru. Z poměrně malé nabídky displejů splňujících požadavky na počet zobrazovaných znaků i napájecí napětí jsem vybral displej od společnosti Raystar Optronics s typovým označením RC2402A-FHY-CSV [44]. Řídicí logika displeje může být napájena napětím od 3,0 do 3,6 V [44], což zajišťuje kompatibilitu s napětovými úrovněmi výstupních pinů mikrokontroléru. Displej je také vybaven podsvětlovacími žlutozelenými LED, které v kombinaci s FSTN Positive [44] technologií LCD panelu zajišťují velmi dobrou čitelnost displeje [45]. Intenzita podsvícení je ovšem řízena protékajícím proudem, jehož nominální hodnota 190 mA dle katalogového listu vytvoří na podsvětlovacích diodách úbytek napětí cca 4,2 V [44]. Pro napájení podsvícení LCD tak bude využit dedikovaný 5V zdroj. Odpovídajícího proudu podsvětlovacích diod bude dosaženo zařazením předřadného rezistoru o hodnotě 3,9 Ω. Modul displeje obsahuje také generátor záporného napětí, které je nezbytné pro správné nastavení kontrastu LCD panelu. K tomu bude sloužit trimr o hodnotě 10 kΩ, zapojený dle [44] mezi napájecí napětí 3,3 V a výstup generátoru záporného napětí. Jezdec trimru pak bude připojen na pin V_o sběrnice displeje.

Zobrazování jednotlivých znaků na LCD panelu zajišťuje standardní řadič ST7066U [44]. Pro komunikaci mikrokontroléru s řadičem je využita osmibitová

datová sběrnice a další tři signální vodiče, kterými se řídí aktuální činnost prováděná se zaslánými daty. Vzhledem k tomu, že se na displeji budou zobrazovat data, která pak nebude třeba zpětně číst, bude signální pin R/W [44] připojen trvale na úroveň logické 0, tj. 0 V. Zbylé signální piny RS a E budou připojeny na piny mikrokontroléru pro umožnění změny jejich logických úrovní nezbytné pro umožnění činnosti displeje. Připojení celé osmibitové datové sběrnice přímo na piny mikrokontroléru by však znamenalo zabránění velkému množství dostupných pinů, a tak bude mezi mikrokontrolér a datovou sběrnici řadiče vložen sérioparalelní převodník, konkrétně SIPO posuvný registr 74HC164 [46]. Činnost posuvného registru je řízena jen hodinovým signálem a datovým vstupem, resetovací vstup nebude zapotřebí, a tak bude připojen trvale na úroveň logické 1 [46]. Pro připojení posuvného registru k mikrokontroléru tak postačí pouze dva piny.

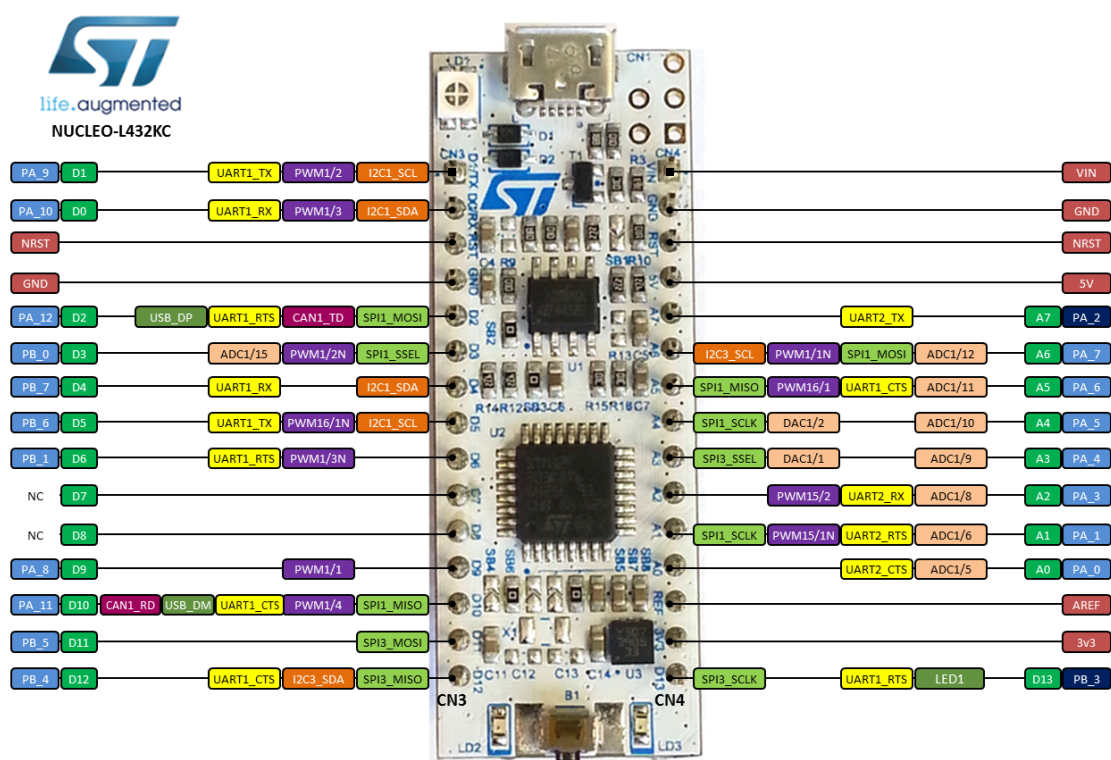
Před započítím zobrazování informací na displeji je třeba nejprve inicializovat řadič, aby věděl, jaké parametry má LCD panel k němu připojený. To se provede zasláním specifického sledu instrukcí na datovou sběrnici řadiče (viz [47] str. 23). Následně s ohledem na mnou požadované zobrazované znaky je třeba některé z nich vytvořit, protože nejsou součástí standardní ASCII tabulky. K tomu slouží prvních osm pozic CGRAM paměti řadiče, do nichž jsou zapsány příslušné kombinace bodů tvořících matici daného znaku. Způsobem popsáním v [47] na str. 16 jsem takto vytvořil znaky á, í, ř, š a ě. Dále jsem také vytvořil vlastní styl symbolů ° a /, které v základním ASCII provedení nevypadaly při použití ve schématu zobrazení dle tabulky 2.3 pěkně. Po provedení těchto úkonů je již možné poslat řadiči na datovou sběrnici sled jednotlivých znaků, čímž dojde k zobrazení požadovaných informací na LCD.

2.2.6 Řídicí mikrokontrolér

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly 2.2, bude pro řízení činnosti komory využít mikrokontrolér. Před výběrem konkrétního typu jsem ale nejprve musel vyřešit celkovou koncepci uspořádání systému (viz kapitoly 2.2.1 až 2.2.5), čímž jsem získal potřebné požadavky na mikrokontrolér, zejména pak počet jeho vstupně-výstupních pinů. Pro připojení veškerých periférií je zapotřebí celkem 20 pinů, z toho čtyři vstupní analogové pro vyhodnocení údajů teploty z analogových teplotních senzorů a jeden s možností PWM výstupu pro řízení vnějších ventilátorů. Vzhledem k tomu, že jsem chtěl mikrokontrolér programovat pomocí frameworku Mbed [48], musel jsem vybrat takový, který by tento způsob programování podporoval. Přímou na stránkách platformy lze nalézt seznam podporovaných vývojových desek [49] kompatibilních s frameworkem Mbed. Pro řízení komory postačuje méně výkonný mikrokontrolér, a tak jsem z podporovaných typů vybral STM32 Nucleo L432KC [50], disponující právě 20 vstupně-výstupními piny (viz obrázek 2.9). V úvahu připadal ještě mikrokontrolér STM32 Nucleo F303K8, který bylo možné sehnat za podobnou cenu. Ve prospěch Nuclea L432KC nakonec rozhodla vyšší kapacita pamětí RAM i ROM a také fakt, že výrobce zařadil mikrokontrolér do rodiny ultra-low power zařízení [51], a tak jeho vlastní spotřeba bude velmi malá.

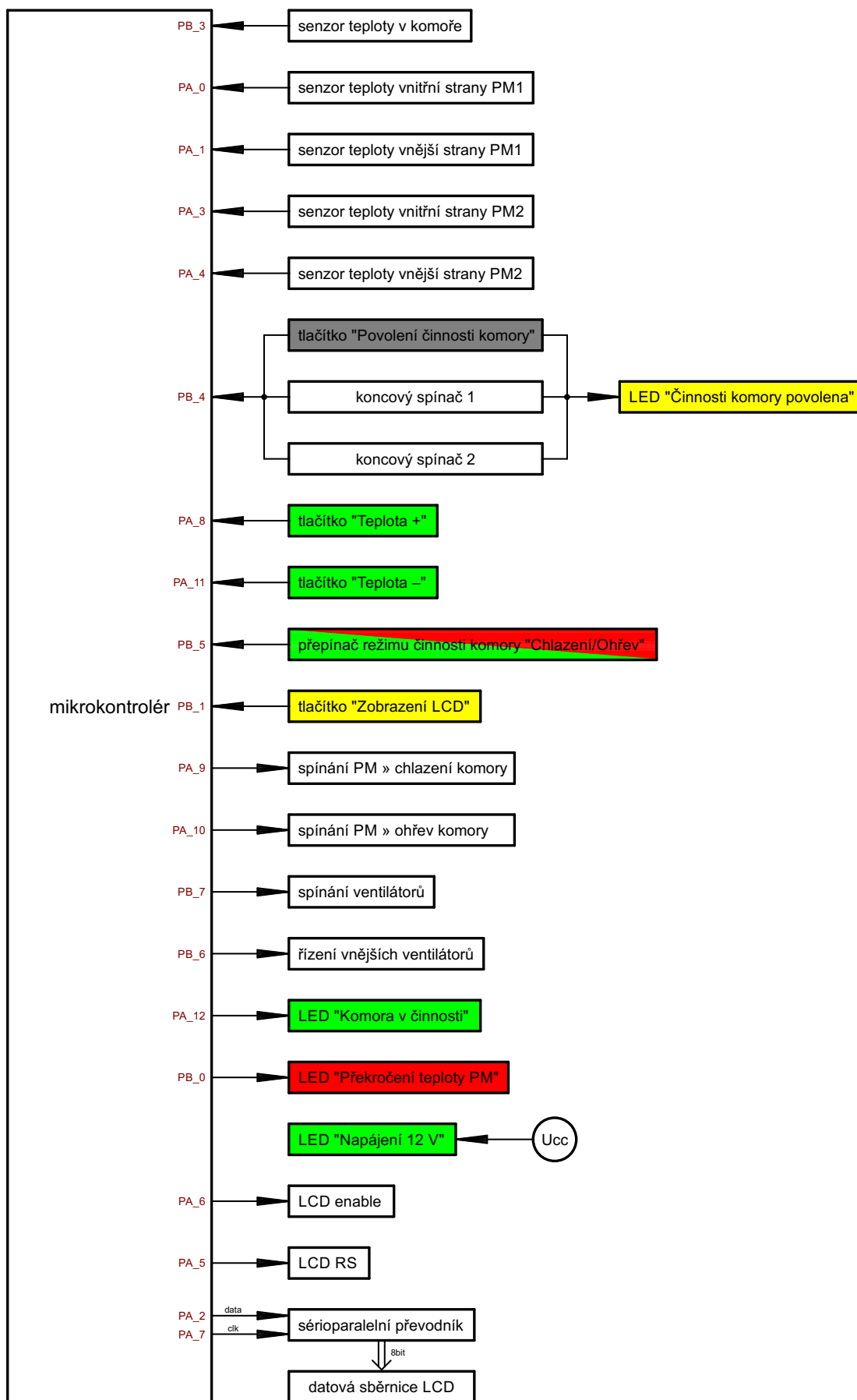
Pro napájení mikrokontroléru jsem předpokládal využití pinu **5V** (viz obrázek 2.9), na který bych připojil napájecí napětí 5 V z dedikovaného 5V zdroje. Realizace tohoto na pohled snadného řešení však skýtá jistá úskalí. Při napájení mikrokontroléru pouze přes pin **5V** totiž není napájen programátor ST-Link, čímž

dochází k permanentnímu resetu mikrokontroléru přes pin **NRST**, který je stále v úrovni logické 0 díky jeho propojení s programátorem [27]. Vzniklý problém lze vyřešit dvěma způsoby. Jedním je rozpojení propojky SB9, čímž se odpojí resetovací výstup programátoru ST-Link od pinu **NRST** mikrokontroléru. Následkem tohoto řešení je ovšem fakt, že bez možnosti resetu mikrokontroléru ST-Link programátorem nelze mikrokontrolér naprogramovat. To by sice pro konečné řešení nevadilo, nicméně při vývoji řídicího programu je to zcela nežádoucí. Druhou, mnohu využitou, možností je propojit napájecí piny **5V** a **VIN** [52], čímž je sice při chodu mikrokontroléru zbytečně napájen programátor ST-Link, nicméně programování je stále možné.



Obrázek 2.9: Označení a funkce jednotlivých pinů Nuclea L432KC [50]

Mikrokontrolér Nucleo L432KC je vybaven konektory kompatibilními s platformou Arduino Nano [50], a tak je ve výchozí konfiguraci mikrokontroléru provedeno několik úprav, které zajišťují nejen fyzickou ale i softwarovou kompatibilitu. Před zahájením vývoje řídicího programu tak bylo nutné otestovat funkčnost jednotlivých pinů, nejprve obecně a následně pro konkrétní využití. Na destičce mikrokontroléru jsem nejprve odpájel propojky SB16 a SB18, čímž došlo ke zrušení provázanosti pinů **PB_6** s **PA_6** a **PB_7** s **PA_5** [27]. Po provedení těchto úprav jsem vyzkoušel individuální funkčnost jednotlivých pinů tak, že jsem každý nastavil jako digitální výstup a připojil na něj LED s předřadným rezistorem. Následně jsem pomocí testovacího programu postupně na každém pinu nastavoval logickou 1 a po chvíli opět logickou 0, čímž jsem si ověřil, že je každý pin možno využít jednotlivě. Druhou fází ověření funkčnosti pinů bylo jejich nakonfigurování pro uvažované využití. Přiřazenou speciální funkci pinu **PA_2** by mělo být možno zrušit rozpojením propojky SB2, čímž by se umožnilo využití pinu **PA_2** i jako analogového vstupu [27]. Bohužel po rozpojení zmiňované propojky mi nešlo do



Obrázek 2.10: Připojení jednotlivých periférií k mikrokontroléru

mikrokontroléru nahrát program, který by využíval pin **PA_2** jako analogový vstup. Z tohoto důvodu jsem využití pinu **PA_2** musel omezit pouze na běžný digitální výstup. Následně jsem ještě odstranil propojku SB15 pro odpojení uživatelské LED LD3 od pinu **PB_3** [27] pro umožnění použití tohoto pinu také jako digitálního vstupu. U všech ostatních pinů jsem žádné omezení funkčního využití neshledal, a tak jsem mohl určit připojení jednotlivých periférií k mikrokontroléru. Při návrhu jsem bral v úvahu skupinové rozmístění jednotlivých periférií na budoucí desce plošného spoje, a tak jsem se snažil podobné periferie připojit na piny, které by se na destičce mikrokontroléru nacházely blízko sebe. Výsledkem je schéma připojení periférií k mikrokontroléru, které je znázorněno na obrázku 2.10². Fotografie dokumentující průběh výše uvedených testů včetně zkušebního připojení periférií k mikrokontroléru jsou součástí přílohy D.

2.2.6.1 Řídicí program

Vývoj řídicího programu jsem prováděl v prostředí programu Microsoft Visual Studio Code³ doplněném o plugin PlatformIO IDE [53], který umožňuje snadné programování vývojových desek s mikrokontroléry. K programování jsem využil framework Mbed [48], který poskytuje snadno uchopitelné nástroje pro konfiguraci jednotlivých pinů mikrokontroléru prostřednictvím předdefinovaných tříd. Samotné programování je pak založeno na programovacím jazyku C/C++.

Řídicí program jsem navrhl jako nekonečnou smyčku, která se po vstupní inicializaci opakuje každých 250 ms. Stav systému je reprezentován pomocí množství proměnných, jejichž hodnoty se v průběhu programu mění dle vstupů od uživatelského rozhraní a senzorů teploty. Vyhodnocení stisku tlačítek a spínačů je ošetřeno pomocí přerušení, kdy každé tlačítko má přiřazenou funkci, která se má provést při jeho stisku, a funkci, která se má provést při jeho uvolnění. Mikrokontrolér tak provádí obsluhu přerušení pouze při detekci vzestupné resp. sestupné hrany na jeho vstupním pinu.

Formou přerušení je také řešeno měření teploty. Číslicový senzor teploty v komoře, který na svém výstupu generuje PWM signál, má obdobně jako tlačítka přiřazené funkce, které se vykonají při vzestupné resp. sestupné hraně PWM signálu. Dále je pak v programu definován časovač, který každých 100 ms spustí funkci pro vyhodnocení hodnoty teploty. K vyhodnocení teploty stran Peltierových modulů slouží také časovač, který spouští příslušnou funkci každých 10 ms. Při jejím volání dojde k vyhodnocení napětí na vstupu A/D převodníku mikrokontroléru od příslušných senzorů. S ohledem na jiný charakter měření teploty z analogových teplotních senzorů, je část kódu vyhodnocující výslednou teplotu také součástí výše zmíněné funkce spouštěné každých 10 ms.

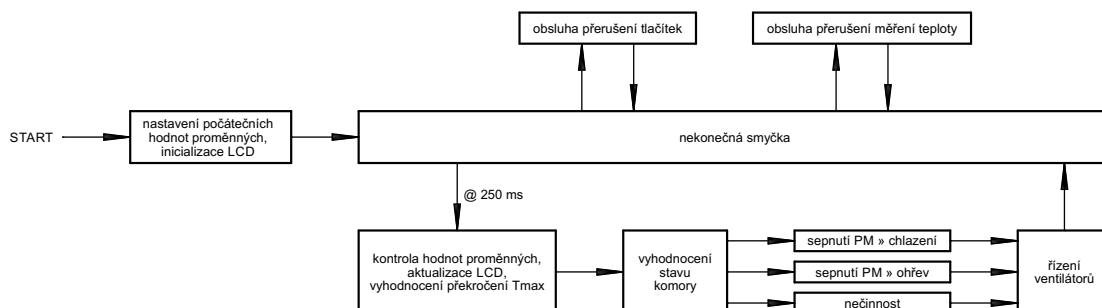
Při běhu nekonečné smyčky programu se nejprve vyhodnotí, zda nedošlo ke změně požadovaného stavu systému prostřednictvím uživatelského rozhraní. Následně dojde k aktualizaci informací zobrazovaných na LCD. Program také periodicky kontroluje, zda nedošlo k překročení definovaných maximálních teplot systému, čímž by pak byla činnost teplotní komory interně zablokována. Poté je již možné na základě porovnání aktuální a nastavené teploty v komoře vyhodnotit, zda má dojít k sepnutí Peltierových modulů pro chlazení nebo ohřev, případně zda

²podbarvení některých bloků odkazuje na barevné provedení dané komponenty na realizovaném modelu teplotní komory

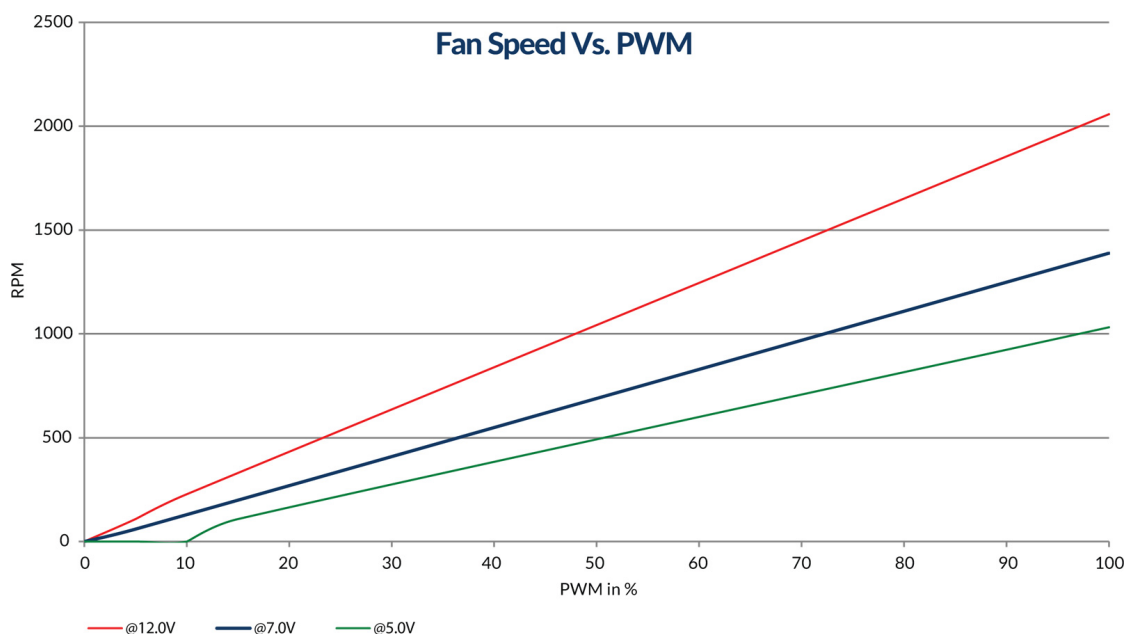
³ke stažení na <https://code.visualstudio.com/>

má být komora v nečinnosti. Nečinnost komory může nastat v různých situacích. Komora není uvedena do chodu obvykle při nepovolení její činnosti indikované rozepnutým spínačem *Povolení činnosti komory* nebo při splnění požadavku na teplotu v komoře. Další možností blokování činnosti komory je výše zmíněná detekce překročení maximálních teplot systému.

Pro vyšší přesnost regulace teploty v komoře je v rozhodovacím algoritmu zavedena hystereze $\pm 0,5$ °C. Při režimu chlazení je tak chlazení deaktivováno při dosažení teploty o 0,5 °C nižší než požadované a opětovně spuštěno při nárůstu teploty o 0,5 °C nad nastavenou mez. V režimu ohřevu pak dochází k přehřátí komory o 0,5 °C a ohřev se znovu aktivuje při dosažení teploty o 0,5 °C nižší než hodnota nastavené teploty. Dále jsem na základě měření parametrů teplotní komory (viz kapitola 4) zavedl omezení nastavení požadované teploty na hodnoty v rozsahu 5 až 40 °C. Vývojový diagram znázorňující činnost programu je na obrázku 2.11.



Obrázek 2.11: Vývojový diagram řídicího programu



Obrázek 2.12: Závislost otáček vnějšího ventilátoru na řídicím PWM signálu [38]

Chlazení chladicích sestav zajišťované ventilátory je spínáno dle aktuálního stavu systému a také dle hodnot jednotlivých tepot. Ventilátory jsou spuštěny vždy, pokud je komora v činnosti, tj. pokud dochází k aktivnímu chlazení nebo ohřevu. Po pominutí aktivního stavu komory se ventilátory vypnou až v okamžiku,

kdy teplota vnitřní i vnější strany obou Peltierových modulů je nižší než 40 °C. Vnější ventilátory umožňují řízení jejich otáček pomocí PWM signálu přivedeného na jejich řídicí vstup. Závislost otáček na střídě PWM signálu je téměř lineární, jak znázorňuje obrázek 2.12. K řízení vnějších ventilátorů jsem využil dvoustavovou regulaci otáček, kdy ventilátory jsou v základním stavu řízeny PWM signálem se střídou 50 %. Pokud by teplota vnějších stran Peltierových modulů překročila 40 °C, dojde ke změně střídou na 100 %, čímž se zvýší otáčky ventilátorů, a tak i průtok vzduchu přes vnější chladiče chladicích sestav, což v konečném důsledku povede ke zvýšení intenzity chlazení.

Výsledný řídicí program včetně kompilačních souborů a binárního souboru pro naprogramování mikrokontroléru je v elektronické příloze F.1.

2.2.7 Celkové zapojení elektroniky a návrh plošného spoje

Jakmile jsem měl navrženo elektrické zapojení veškerých dílčích částí řídicí elektroniky teplotní komory včetně jejich připojení k mikrokontroléru, mohl jsem přistoupit k návrhu desky plošných spojů. K návrhu jsem využil volně dostupnou verzi program EAGLE⁴, která obsahuje omezení velikosti DPS na 80 cm². Toto omezení nicméně platí pouze při využití funkcí automatického návrhu cest propojení na DPS pomocí autorouteru. Na manuální návrh se však neuplatňuje, proto jsem mohl při návrhu využít i větší plochy DPS.

První částí návrhu bylo nakreslení celkového schéma zapojení (viz příloha A), do kterého jsem musel zahrnout i konkrétní způsob připojení jednotlivých externích komponent k DPS. Napájecí komponenty a Peltierovy moduly budou připojeny pomocí FASTON konektorů o rozměrech 6,3×0,8 mm. Pro připojení ostatních periférií poslouží jednořadé a dvouřadé vícepinové konektory s roztečí pinů 2,54 mm. Při zkušebním zapojení na nepájivých polích (viz obrázek 20 v příloze D) jsem ale zjistil poměrně velkou citlivost na přechodové odpory vzniklé na vícepinových konektorech u připojení podsvětlovacích LED LCD displeje. Pro zajištění neměnné intenzity podsvícení LCD tak budou podsvětlovací LED připojeny také pomocí FASTON konektorů. S ohledem na malou výšku prostoru pro DPS (viz obrázek 2.13 v kapitole 2.3) budou všechny použité konektory uzpůsobeny pro připojení jejich protikusů v úhlu 90°.

Při tvorbě schématu zapojení bylo nutné brát zřetel na způsob umístění jednotlivých součástek na DPS a mimo jiné také na uspořádání jejich vývodů. Výška veškerých součástek umístěných na DPS musí být menší než cca 1,5 cm, aby bylo možné realizovanou DPS umístit do prostoru k tomu určenému. Z tohoto důvodu budou všechny spínací tranzistory s pouzdrem TO220 umístěny naležato. Bohužel v mnou používaných knihovnách součástek je k dispozici v ležatém pouzdře TO220 pouze unipolární tranzistor s kanálem N. Naštěstí je rozložení vývodů použitých unipolárních tranzistorů s kanálem P [33] shodné s unipolárními tranzistory s kanálem N [34], a tak je možné pro získání správného pouzdra tranzistoru s kanálem P použít symbol tranzistoru s kanálem N. Ve schématu je pak u tranzistorů využívajících výše uvedenou náhradu uvedena poznámka o správném typu tranzistoru, tj. s kanálem P.

Dalšími problémovými součástkami pak byly unipolární tranzistory v pouzdru TO92 tvořící invertor, jejichž uspořádání vývodů je odlišné od většiny součástek

⁴ke stažení na <https://www.autodesk.com/products/eagle/free-download>

v mnou používaných knihovnách. U tranzistoru BS170 [32] stačilo mírně upravit symbol jiného tranzistoru s pouzdrem SOT54E, jehož vývody byly shodné. Naopak symbol tranzistoru TP2104 [31] jsem musel vytvořit nový, neboť žádný z tranzistorů dostupných v knihovnách neměl požadované uspořádání vývodů. Poslední součástkou, pro kterou bylo třeba najít odpovídající symbol pro tvorbu DPS byl spínaný zdroj VR10S05 [28]. Vzhledem k tomu, že tyto spínané zdroje jsou koncipovány jako náhrada 1:1 za standardní lineární stabilizátory řady 78xx, jsem použil univerzální symbol určený pro stabilizátor 78xx s pouzdrem TO220 k němuž jsem dokreslil odpovídající obrysy místa, které bude zabírat modul zdroje VR10S05.

Následně jsem se mohl pustit do návrhu rozmístění součástek na DPS a tvorby plošného spoje. Rozměry desky jsem volil dle předpokládaných rozměrů dostupného prostoru (viz kapitola 2.3). Maximální šířka DPS by mohla být po odečtení místa nutného pro připojení konektorů až 206 mm a výška téměř 130 mm. Při návrhu šířky spojů na DPS bylo nutné zohlednit také proudy, které jimi potečou. Ve výkonové části desky budou při sepnutí Peltierových modulů téci proudy okolo 10 A, na které bylo nutné dimenzovat dané spoje. Při užití desky potažené 35 μ m vrstvou mědi a připuštění zvýšení teploty spojů z okolních 25 °C na 45 °C je pro vedení proudu o hodnotě 10 A dle normy IPC-2221⁵ nutná šířka spojů téměř 5 mm. Po započítání návrhu jednotlivých cest na DPS jsem nicméně došel k závěru, že takto široké spoje není možné z technologických ani prostorových důvodů na výsledné DPS realizovat. Hlavním důvodem byla rozteč vývodů spínacích tranzistorů, ke kterým by nebylo možné přivést 5 mm široký spoj. Dále by také takto široké spoje zabíraly téměř tři centimetry prostoru po celé délce výsledné DPS. Proto jsem se rozhodl tyto spoje realizovat odlišným způsobem. Na DPS bude každý výkonový spoj tvořen pouze 2 mm širokým páskem mědi, který ale bude po finálním osazení pocínován cca 0,5 mm tlustou vrstvou cínu, čímž bude zajištěn dostatečný průřez spoje pro vedení velkých proudů.

Při návrhu rozmístění součástek a jednotlivých spojů na DPS jsem se snažil podobné součástky umísťovat shodně orientované pro dosažení vyšší estetické úrovně vzhledu osazené DPS. Dále jsem pro vyšší míru minimalizace výsledné desky využil některých nezapojených vývodů operačních zesilovačů a také mikrokontroléru, pod kterými jsou vedeny jiné spoje. Při výrobě DSP je tak nutné provést úpravu masky nanesené na DPS před leptáním. Konkrétně je třeba odstranit plošky pinu číslo 5 u operačních zesilovačů označených ve schématu jako IC_5 a IC_6 . Dále je třeba obdobnou úpravu provést u pinů **PC_14** a **PC_15** mikrokontroléru. Mikrokontrolér i operační zesilovače budou následně osazeny v patičkách, aby je bylo možné snadno vyjmout z desky. Před osazením DPS tak budou z daných patiček vyjmuty příslušné nezapojené piny, pod kterými jsou vedeny jiné spoje. Dále jsem také využil volného místa pod mikrokontrolérem, který se bude nacházet přibližně jeden centimetr nad rovinou desky díky jeho umístění v patičkách. Pod mikrokontrolér jsem tak mohl umístit některé rezistory a kondenzátory, čímž jsem dosáhl další optimalizace velikosti DPS a spojů na ní provedených. Schémata výsledného návrhu plošného spoje včetně podkladů pro jeho výrobu jsou v příloze B.

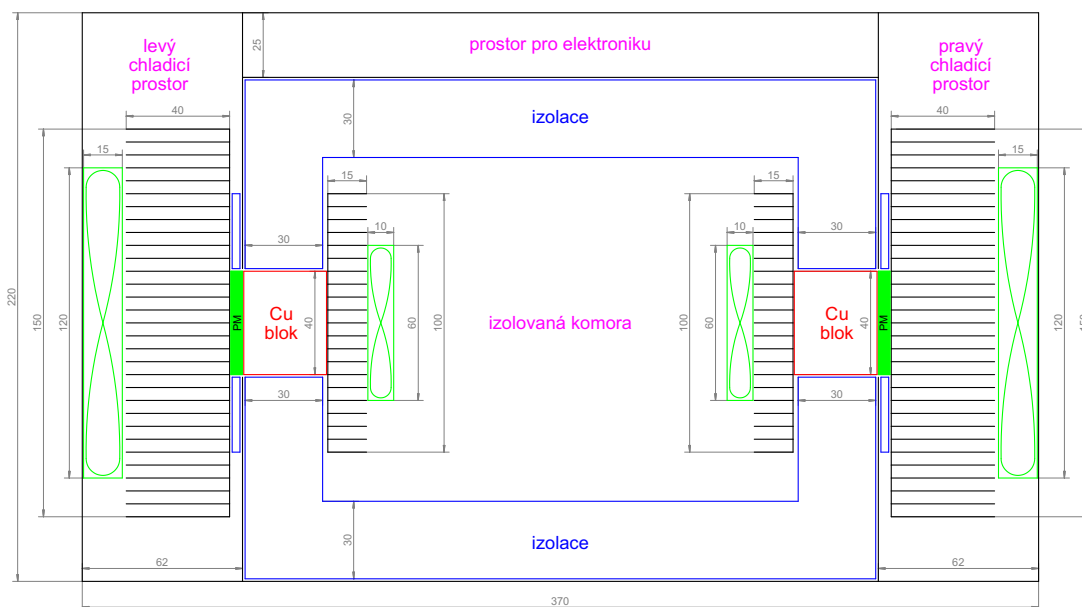
⁵výpočty byly provedeny pomocí aplikace Electrodoc (ke stažení na <https://play.google.com/store/apps/details?id=it.android.demi.elettronica>), která tuto normu aproximuje

2.3 Mechanické uspořádání komory

Poslední částí systému teplotní komory, kterou bylo třeba navrhnout, bylo provedení izolované komory a konstrukční řešení skříně, ve které se bude nacházet jednak samotná izolovaná komora, jednak veškerá řídicí elektronika. S ohledem na fakt, že každá z obou chladicích sestav váží více než 1 kg, jsem se rozhodl využít ke konstrukci skříně komory ocelové plechy o tloušťce 1 mm. Bude tak zajištěna dostatečná robustnost výsledného zařízení a zároveň nebude hrozit prohnutí či jiné zdeformování částí, k nimž budou přichyceny chladicí sestavy.

2.3.1 Konstrukční řešení skříně komory

Před nakreslením konkrétních výkresů jednotlivých plechů, z nichž bude sestavena celková skříň komory, bylo nejprve třeba určit rozměry skříně dle uspořádání velikostně významných prvků uvnitř skříně komory. Podle návrhu chladicího systému provedeného v kapitole 2.2 budou chladicí sestavy umístěny ve stěnách izolované komory symetricky proti sobě. Skříň komory tak lze rozdělit na čtyři samostatné sekce – izolovanou komoru, prostor pro elektroniku a dvě sekce sloužící pro umístění vnějších částí chladicích sestav. Horizontální průřez výsledným uspořádáním teplotní komory v polovině její výšky je znázorněn na obrázku 2.13.

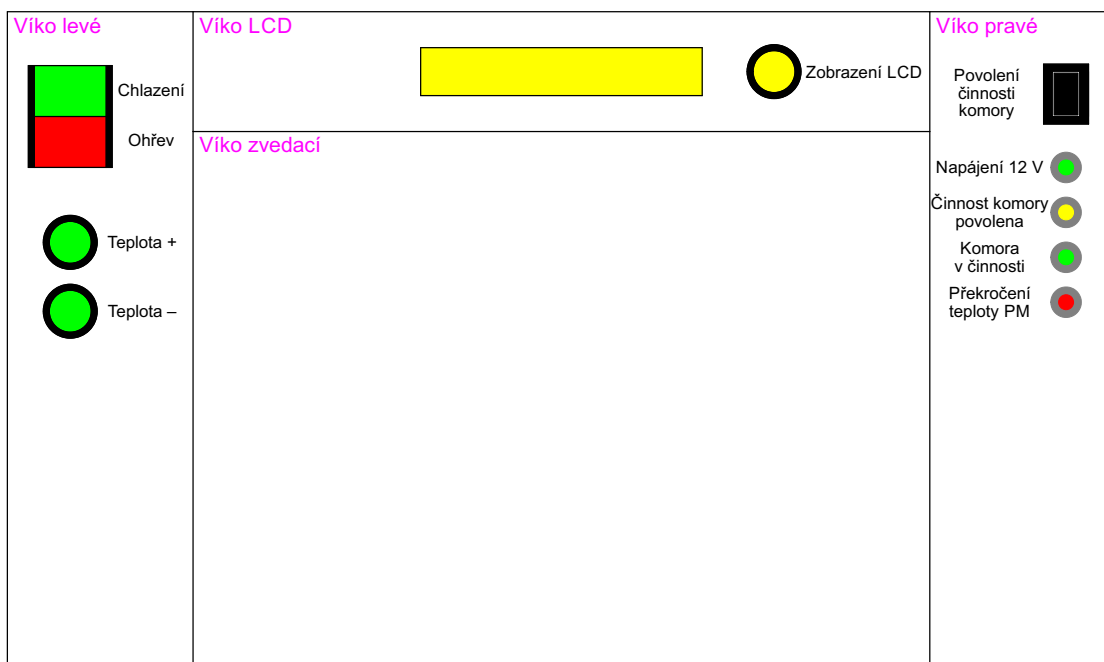


Obrázek 2.13: Uspořádání teplotní komory

Když jsem již znal celkové rozměry výsledného zařízení, mohl jsem začít s návrhem jednotlivých plechů tvořících skříň komory a jejich vzájemného spojení. Nejprve jsem navrhl rozmístění ovládacích prvků komory. Veškeré prvky nutné k ovládnutí komory budou umístěny na víku, oproti tomu hlavní vypínač, pojistka a přívod 12V napájení se budou nacházet na zadní stěně skříně komory.

Víko bude složeno ze čtyř samostatných plechů, z nichž tři budou využity k umístění komponent uživatelského rozhraní. V horní části dílu **Víko levé** umístěném nad levým chladicím blokem se bude nacházet přepínač *Chlazení/Ohřev* a také tlačítka pro nastavení požadované teploty *Teplota +* a *Teplota -*. Symetricky na plechu **Víko pravé** umístěném nad pravým chladicím blokem se bude

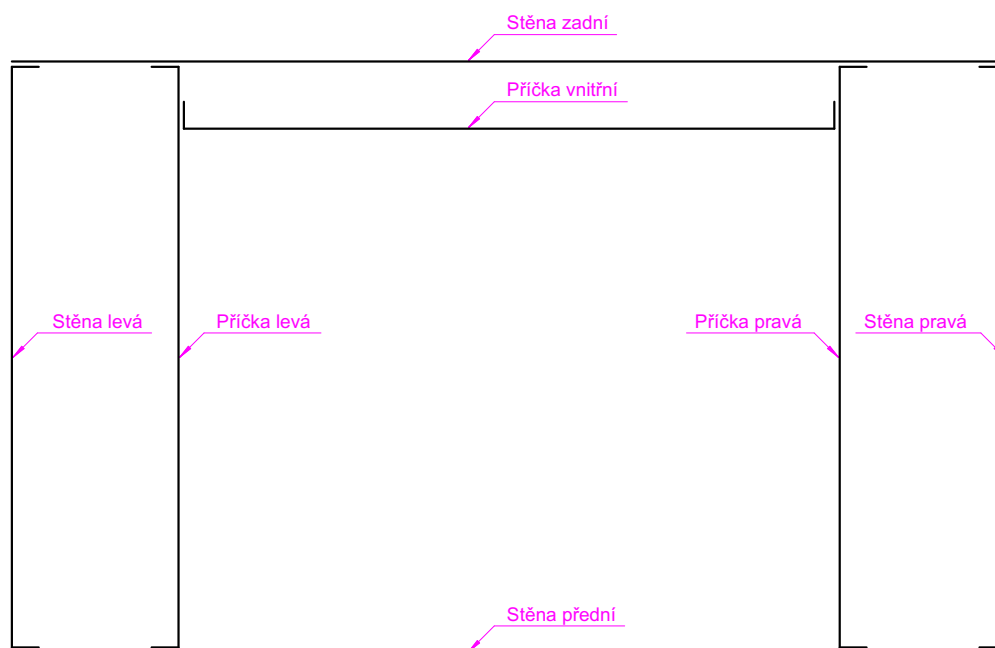
nacházet spínač *Povolení činnosti komory*, pod kterým budou umístěny všechny čtyři indikační LED. Ve směru odshora dolů se bude nacházet nejprve zelená LED indikující připojení komory k napájení 12 V, následovat bude žlutá LED signalizující povolení činnosti komory a zelená LED oznamující připojení Peltierových modulů na napájení. Poslední pak bude LED červené barvy, jejímž účelem je indikovat překročení povolené teploty Peltierových modulů. V horní části víka mezi díly **Víko levé** a **Víko pravé** bude umístěn plech označený jako **Víko LCD**. Jak již název dílu napovídá, hlavní komponentou umístěnou na tomto plechu bude LCD displej. Konkrétní umístění displeje na dílu **Víko LCD** je voleno s ohledem na horizontální i vertikální vystředění LCD panelu. Vpravo vedle displeje se pak bude nacházet ještě tlačítko *Zobrazení LCD* sloužící pro přepnutí zobrazovaných informací na LCD. Posledním plechem tvořícím vrchní část skříně komory pak bude díl **Víko zvedací**, po jehož odklopení bude umožněn přístup do prostoru izolované teplotní komory. Celkové uspořádání výše uvedených dílů včetně zakreslených ovládacích a indikačních prvků uživatelského rozhraní je na obrázku 2.14.



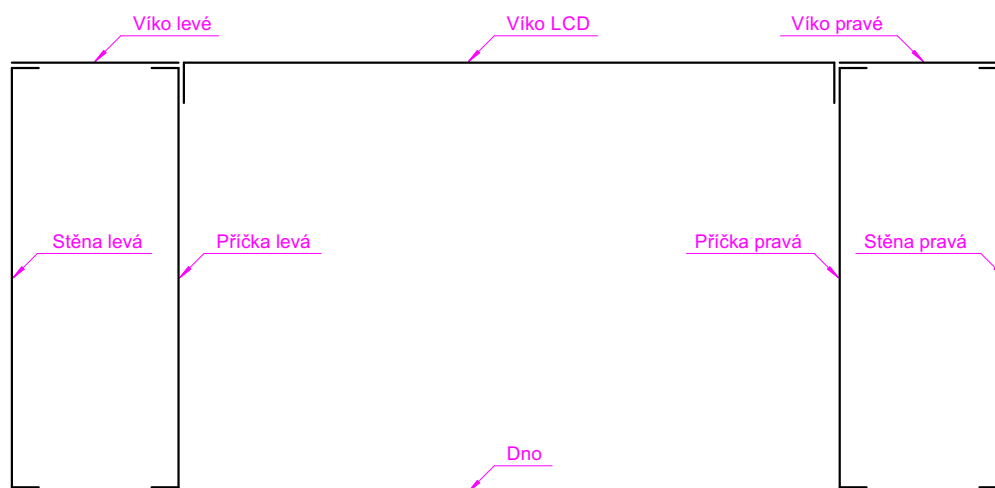
Obrázek 2.14: Nákras vrchní části skříně teplotní komory s rozmístěním ovládacích prvků

Před návrhem zbylých částí skříně komory bylo třeba ještě vyřešit jejich vzájemné spojení. Protože jsem měl možnost jednotlivé plechy ohnout na strojní ohýbačce v dílně na fakultě, zvolil jsem pro spojení jednotlivých plechů právě malé záhyby, v nichž budou otvory opatřené metrickým závitem pro přichycení příslušných dílů pomocí šroubů. Umístění ohybů na jednotlivých dílech jsem volil s ohledem na předpokládaný postup finální montáže komory a také na estetickou stránku jejího vnějšího opláštění. Hlavní spojení dílů skříně komory tak bude zajištěno pomocí plechů **Stěna levá**, **Stěna pravá**, **Příčka levá** a **Příčka pravá**, které budou opatřeny ohyby na všech čtyřech okrajích. K těmto ohybům pak budou přichyceny díly **Dno**, **Stěna přední**, **Stěna zadní**, **Víko levé** a **Víko pravé**. Díl **Příčka vnitřní** pak bude opatřen ohyby na třech stranách pro jeho přichycení k dílům **Příčka levá**, **Příčka pravá** a **Dno**. Přichycení zbyvajících částí víka

skříně komory pak bude zajištěno pomocí dvou ohybů na dílu **Víko LCD**, který jejich prostřednictvím bude přichycen k díkům **Příčka levá** a **Příčka pravá**. Díl **Víko zvedací** pak bude flexibilně spojen s dílem **Víko LCD** pomocí dvou otočných pantů. Pro dosažení vyšší estetické celistvosti skříně komory budou ještě díly **Stěna přední** a **Stěna zadní** doplněny malými ohyby na jejich horních a dolních okrajích. Tyto ohyby zajistí skrytí případné malé mezery vzniklé mezi jednotlivými plechy. Ohyby na všech dílech budou vždy provedeny směrem dovnitř prostoru nepřístupného uživateli. Ohyby všech čtyř stěn tak budou provedeny směrem do vnitřního prostoru skříně komory, kdežto ohyby jednotlivých příček budou naopak směřovat od prostoru izolované teplotní komory. Ohyby dílu **Víko LCD** pak budou směřovat směrem dolů. Provedení podstatných ohybů je znázorněno na obrázcích 2.15 a 2.16.



Obrázek 2.15: Horizontální průřez skříně komory znázorňující umístění ohybů pro spojení většiny plechů



Obrázek 2.16: Vertikální průřez skříně komory znázorňující umístění vybraných dalších ohybů pro spojení plechů

Následně jsem již mohl začít kreslit výkresy jednotlivých plechů. Nejprve jsem dokreslil konkrétní podobu plechů tvořících víko skříně komory. Díly **Víko levé** a **Víko pravé** obsahují kromě otvorů pro montáž příslušných spínačů a držáků indikačních LED pouze čtyři otvory pro jejich přichycení k dalším dílům. Nejsložitější z dílů tvořících víko komory je díl **Víko LCD**. Na něm jsou kromě obdélníkového otvoru pro LCD panel a otvoru pro uchycení tlačítka *Zobrazení LCD* také zářezy umožňující zvednutí víka komory s otočnými panty. V okolí těchto zářezů se nachází také čtveřice otvorů určená právě pro uchycení pantů. Na dílu **Víko LCD** jsou dále ještě čtyři malé otvory pro přichycení modulu displeje a také čtyři další otvory určené pro spojení s ostatními díly. Ohyby tohoto dílu jsou mírně vykousnuté, aby při finální montáži nekolidovaly se zakrývacím horním ohybem dílu **Stěna zadní**. Plech **Víko zvedací** pak obsahuje poměrně málo otvorů. Jsou na něm umístěny pouze čtyři otvory pro přichycení otočných pantů a dále jeden otvor, ke kterému bude připevněn úchop sloužící ke zvednutí víka komory. Dále jsou ještě u hrany sousedící s dílem **Víko LCD** umístěny dva zářezy v místech, kde by při zvednutí víka komory došlo ke kolizi se šrouby uchycujícími modul displeje k dílu **Víko LCD**.

Zřejmě nejkomplikovanějšími plechy jsou díly **Příčka levá** a **Příčka pravá**. Díly jsou vzájemně velmi podobné neboť plní shodnou funkci, jen se nacházejí na opačných stranách izolované komory. Přibližně uprostřed se nachází čtvercový otvor pro průchod chladicí sestavy. Na spodní straně tohoto otvoru jsou dva malé zářezy, které zajišťují ničím neblokované vyvedení vodičů od Peltierových modulů. Dále je na vertikální stěně otvoru blíže přední stěně skříně komory umístěn další zářez sloužící k umístění teplotního senzoru vnitřní strany Peltierových modulů. Nad otvorem na chladicí sestavu je ještě malý kruhový otvor, který zajišťuje, že teplotní senzor vnější strany Peltierových modulů se nebude dotýkat plechové příčky. Na obou dílech jsou dále umístěny otvory pro přichycení chladicí sestavy a také pro přichycení dalších plechů. Posledními otvory jsou průchodky pro provedení přívodních vodičů vnitřních ventilátorů, umístěné pod otvorem pro chladicí sestavu, a otvory pro vodiče vedoucí ke koncovým spínačům, které se nacházejí velmi blízko ohybu sloužícímu pro přichycení přední stěny komory. U zadní stěny komory se pak na dílech **Příčka levá** a **Příčka pravá** nacházejí výřezy pro přivedení vodičů od jednotlivých komponent k elektronice. Ve spodní části je umístěn výřez určený pro vodiče, jimiž budou v aktivním stavu komory protékat velké proudy. Výřez v horní části pak bude sloužit vodičům signálním, které tak budou dostatečně vzdálené od vysokoproudových vodičů, čímž bude zabráněno případnému rušení. Dále je u dílu **Příčka levá** oproti dílu **Příčka pravá** navržen kratší zadní ohyb z důvodů jeho kolize s uchycením pojistky v dílu **Stěna zadní**.

Shodné absolutní rozměry jako díly **Příčka levá** a **Příčka pravá** mají také díly **Stěna levá** a **Stěna pravá**. Na těchto vnějších stěnách jsou přichyceny pouze vnější ventilátory chladicích sestav. Proto se v nich nachází velký kruhový otvor pro přívod vzduchu k ventilátoru, jehož poloha je volena tak, aby co nejvíce ofukoval vnější chladič chladicí sestavy. Kromě otvorů pro přichycení dalších plechů se v těchto dílech nacházejí jen čtyři otvory pro přichycení vnějších ventilátorů. Zadní ohyb dílu **Stěna pravá** má navíc navržen obloukový výbrus v místě, kde by kolidoval s uchycením autozásuvky v dílu **Stěna zadní**.

Dalšími díly s vyšší výrobní náročností jsou plechy **Stěna přední** a **Stěna zadní**. V těchto dílech jsou totiž umístěny větrací otvory pro odvod horkého vzduchu od vnějších chladičů chladicích sestav. Ty jsou nominálně tvořeny mřížkou

z 4×11 otvorů o průměru 8 mm. V dílu **Stěna přední** jsou provedeny bezezbytku, nicméně v dílu **Stěna zadní** je počet realizovatelných otvorů omezen umístěním hlavního vypínače, pojistky a přívodu napájení 12 V. Všechny tyto větrací otvory budou kryty jemnou síťovou mřížkou. V plechu **Stěna zadní** je kromě výše zmíněných větracích mřížek ještě další mřížka, která zajišťuje přirozenou cirkulaci vzduchu do prostoru s řídicí elektronikou. Tato doplňková mřížka je tvořena 17×6 otvory o průměru 5 mm. V pomyslných rozích mřížky elektroniky se pak nachází otvory pro přichycení přílozek krycí síťové mřížky, která se bude nacházet na vnitřní straně plechu. V dílech **Stěna přední** i **Stěna zadní** se dále nachází osm otvorů určených pro spojení s dalšími plechy. Jak již bylo zmíněno výše, jsou oba plechy doplněny o malé estetické ohyby na horní a spodní straně. Horním ohyb obou plechů je ovšem odlišný. Díl **Stěna přední** jej má ve střední části vypuštěn úplně, aby bylo možné zvedat víko teplotní komory. Oproti tomu u dílu **Stěna zadní** je v horním ohybu pouze malý podlouhlý zářez v místech, kde bude u navazujícího dílu **Víko LCD** umístěn displej. Ve spodní části dílu **Stěna zadní** jsou pak umístěny napájecí prvky komory. Na levé straně je umístěna autozásuvka pro přívod napájení 12 V. Na pravé straně se pak nachází otvory pro montáž hlavního vypínače a pojistky.

Zbývající díly **Dno**, **Příčka vnitřní** a dva kusy dílu **Příložka na síťka krytí průduchů k elektronice** jsou oproti ostatním plechům velmi jednoduché na výrobu. V dílu **Dno** se nachází pouze deset otvorů pro přichycení k dalším plechům. Díl **Příčka vnitřní** pak obsahuje pouze šest otvorů stejného určení, čtyři otvory pro přichycení DPS a jeden větší otvor sloužící k vyvedení vodičů od senzoru teploty v komoře. Dvojice identických dílů **Příložka na síťka krytí průduchů k elektronice** pak obsahuje pouze dva otvory pro jejich přichycení k dílu **Stěna zadní**.

Pro návrh montážních otvorů jednotlivých komponent uživatelského rozhraní a napájecích prvků byly využity buď přesné, nebo mírně upravené vzory z katalogových listů příslušných součástí (viz [44], [54], [55], [56], [57], [58], [59] a [60]). Výkresy všech třinácti typových dílů tvořících skříň komory jsou v příloze C. Na výkresech plechů, u nichž jsou navrženy ohyby, jsou také znázorněny linie ohybů. Ty jsou kresleny tak, aby při přiložení ohýbací příložky k dané čáře ze směru od středu plechu měl plech po ohnutí části vně příložky patřičnou velikost.

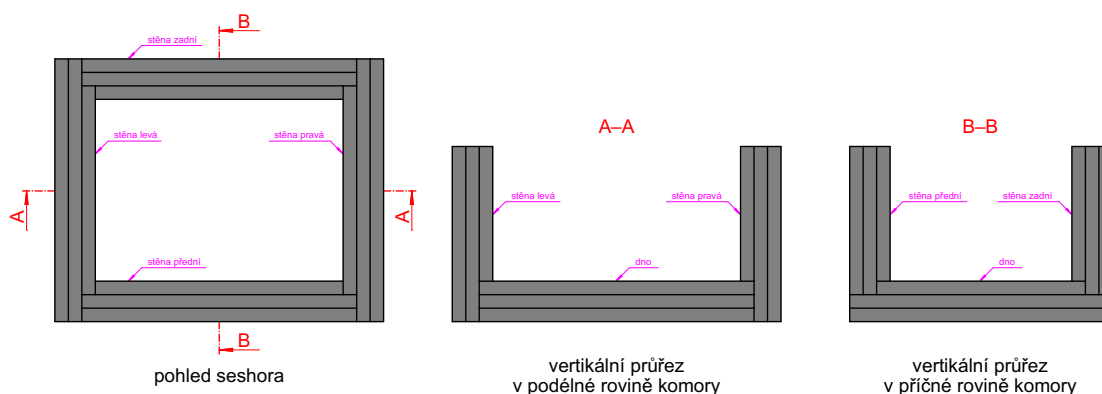
2.3.2 Konstrukce izolované komory

Podle návrhu uspořádání skříňové komory (viz obrázek 2.13) bude izolovaná komora tvořena stěnami silnými 30 mm. Oproti práci [21] tak budou izolační stěny o 1 cm tenčí, nicméně i tak by měla být zajištěna dostatečná míra tepelné izolace. Ke konstrukci těchto stěn bylo třeba zvolit vhodný izolační materiál. V úvahu připadaly různé typy polystyrenů a také další materiály, např. polyuretan, který použili právě autoři práce [21]. Z důvodů vyšší ceny polyuretanových desek jsem zvolil užití polystyrenu. Ten se vyrábí ve dvou různých provedeních – expandovaný tzv. EPS polystyren a extrudovaný tzv. XPS polystyren [61]. Tepelně-izolační vlastnosti obou typů jsou víceméně podobné, ale XPS polystyren dosahuje mírně nižší hodnoty součinitele tepelné vodivosti λ [61]. Dalším podstatným rozdílem obou polystyrenů je jejich struktura. EPS polystyren je tvořen otevřenými buňkami, což má za následek jeho drobení při zpracovávání. Oproti tomu XPS polystyren tvoří pouze uzavřené buňky, a proto vykazuje výrazně vyšší pevnost i mechanic-

kou odolnost [61].

Z výše uvedených důvodů jsem pro provedení izolované komory zvolil XPS polystyren. Protože budou stěny komory tvořeny 30 mm silnou vrstvou izolace, rozhodl jsem se je vyhotovit ze tří 10mm vrstev. Zvolené řešení umožňuje navržení tzv. zámků, které budou minimalizovat případné tepelné úniky přes spoje jednotlivých stěn. Pro výrobu izolované komory bude použit 10mm XPS polystyren od firmy Austrotherm řady TOP 30 GK s tepelnou vodivostí $\lambda = 0,033 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [62]. Jednotlivé stěny a dno tvořené ze tří slepených vrstev budou mít vytvořeny zámkové spoje pro jejich snadné sesazení, jak je znázorněno na obrázku 2.17. Uprostřed zadní izolační stěny komory pak bude zabudován teplotní senzor pro měření aktuální hodnoty teploty v komoře. V předním horním rohu levé i pravé stěny se budou nacházet koncové spínače, které budou indikovat zavřené víko komory. Izolační víko komory bude také tvořeno třemi vrstvami polystyrenu a bude přilepeno k plechovému dílu skříně komory **Víko zvedací**. Všechny uživatelsky dostupné stěny izolační komory budou ještě přeplátovány tenkou plastovou deskou, čímž bude zajištěna vyšší odolnost komory proti mechanickému poškození.

Při započítání 30 mm silných izolačních stěn a 1mm krycí plastové desky vychází vnitřní rozměry izolované komory $\text{š}\times\text{v}\times\text{h}$ jako $184\times 98\times 133 \text{ mm}$. Hodnota absolutního objemu komory tak vychází přibližně $2,4 \text{ dm}^3$. Po odečtení místa zabraného vnitřní částí chladicích sestav (vnitřní chladič, vnitřní ventilátor a mřížka) získáme využitelné rozměry izolované komory $\text{š}\times\text{v}\times\text{h}$ jako $124\times 98\times 133 \text{ mm}$. Prakticky využitelný objem izolované komory je tedy $1,6 \text{ dm}^3$.



Obrázek 2.17: Uspořádání desek tvořících izolovanou komoru

Kapitola 3

Výroba modelu teplotní komory

Po úspěšném dokončení návrhu systému teplotní komory jsem mohl začít s vlastní výrobou. První částí, na kterou jsem se zaměřil, bylo vyhotovení chladičích sestav a konstrukční části skříně komory. Dále bylo třeba realizovat navrženou DPS a izolovanou komoru. Poté jsem již mohl všechny dílčí části zkompletovat a vytvořit tak funkční model teplotní komory.

3.1 Výroba skříně zařízení

Skříň systému s teplotní komorou bude vyrobena z ocelového plechu o tloušťce 1 mm. Z výkresů jednotlivých částí (viz příloha C) jsem nejprve určil absolutní velikosti dílčích plechů potřebné pro jejich výrobu. Výchozí rozměry plechů a jejich počet je uveden v tabulce 5. Z těchto údajů jsem následně určil potřebnou velikost plechu pro výrobu všech dílčích částí. Nejvýhodněji z cenového hlediska vyšel plech o rozměrech 1000×600 mm, ze kterého je možné vyrobít všechny požadované díly s minimálními zbytky.

Tabulka 3.1: Absolutní velikosti plechů pro výrobu jednotlivých dílů

označení výkresu	název dílu	počet kusů	rozměry [mm]
C.1	Dno	1	370×220
C.2	Stěna pření	1	370×168
C.3	Stěna zadní	1	370×168
C.4	Stěna levá	1	238×178
C.5	Stěna pravá	1	238×178
C.6	Příčka levá	1	238×178
C.7	Příčka pravá	1	238×178
C.8	Příčka vnitřní	1	264×139
C.9	Víko levé	1	220×62
C.10	Víko pravé	1	220×62
C.11	Víko LCD	1	274×40
C.12	Víko zvedací	1	244×177
C.13	Příložka na sítku krytí průduchů k elektronice	2	190×10

Pro výrobu jednotlivých plechů jsem mohl využít dílnu na fakultě, kde jsem vstupní plech nejprve nastříhal pomocí tabulových nůžek na plech na obdélníkové díly požadovaných rozměrů. Následně jsem pomocí ručních nůžek na plech vyhotovil většinu velikostně významných zářezů. Na jednotlivé plechy jsem pak dle výkresů nakreslil vzory, které je třeba vyfrézovat, a také jsem vyznačil středy všech kruhových děr. Všechny tyto otvory v jednotlivých dílech pak nahrubo vyvrtal a vyfrézoval pracovník katedry pan Miroslav Horník, který mi tak ušetřil spoustu práce. Na nahrubo opracovaných dílech jsem pak vyhotovil potřebné ohyby pomocí ohýbačky na plech. Tímto jsem měl hotovou tu část výroby plechů, kterou jsem realizoval v dílně na fakultě. Zbylé dokončovací práce jsem již prováděl v domácí dílně. Všechny nahrubo opracované kruhové otvory jsem zahladil pomocí vrtáků vyšších průměrů. Nekruhové otvory a zářezy jsem pak vybrousil do požadovaných rozměrů pomocí pilníků různých hrubostí. Dále jsem také zahladil všechny hrany a rohy plechů tak, aby nebyly na dotek ostré.

Ve všech otvorech o průměru 3,2 mm jsem následně pomocí závitníků vyřízl metrický závit M4 pro možnost uchycení příslušných plechů pomocí šroubů zašroubovaných přímo do plechu druhého bez použití matky. Bohužel kvůli výrobní chybě byly otvory s průměrem 3,2 mm v dílu **Příčka vnitřní** vyvrtány 4mm vrtákem, a tak bude tento plech spojen s dalšími plechy pomocí šroubů zašroubovaných do matek umístěných ve vnitřní části skříně komory. Další nedostatek se objevil u dílu **Víko LCD**, u něhož jsem v původní verzi výkresu, podle které byl vyroben, špatně navrhl umístění 3,2mm děr v ohybech¹. Výše zmíněné uchycovací otvory v dílu **Víko LCD** a příslušné protilehlé otvory v dílech **Příčka levá** a **Příčka pravá** jsem tak s pomocí frézovacích vrtáků zvětšil natolik, aby bylo možné díly spojit v požadované poloze. Pro přichycení dílu **Víko LCD** k dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá** jsou tak použity šrouby zašroubované do matky místo do závitu v plechu jako v případě přichycení dílu **Příčka vnitřní**. Dále je s ohledem na velikost zvětšených děr použita podložka jednak u šroubu, jednak u matky, aby se zabránilo jejich případnému propadnutí těmito otvory.



Obrázek 3.1: Zkušební sestavená skříň komory

¹v příloze C se nachází již upravený výkres, který má tyto otvory zakresleny správně

Po vyřešení výše popsaných problémů jsem mohl zkušebně sestavit všechny plechy, abych zjistil, zda jednotlivé díly k sobě lícují tak, jak mají. Některé spojovací otvory jsem musel také mírně vyfrézovat, aby nedocházelo k pnutí mezi jednotlivými díly při jejich sešroubování. Tyto mírné úpravy již naštěstí neměly vliv na způsob vzájemného sešroubování jednotlivých plechů. Podobu zkušebně sestavené skříně teplotní komory zachycuje obrázek 3.1. Další fotografie zkušebně sestavené skříně komory se nacházejí v příloze D.

Jakmile byly veškeré plechy zcela obrobena dle výkresů a upraveny do stavu umožňujícího jejich vzájemné spojení, mohl jsem přistoupit k provedení jejich povrchové úpravy. K té jsem využil vodou ředitelnou barvu, odstín Palisandr. Před nanesením základní vrstvy barvy bylo třeba plechy nejprve důkladně odmastit, aby k nim barva dobře přilnula. Základní nátěr jsem provedl dostatečně naředěnou výše uvedenou krycí barvou. Po zaschnutí základního nátěru jsem na všechny plechy aplikoval druhou vrstvu barvy, tentokrát již výrazně méně naředěnou vodou. Nakonec jsem ještě na všechny strany plechů, tvořících vnější opláštění skříně komory, nanaslel třetí vrstvu barvy pro zvýšení odolnosti nátěrů proti případným oděrům. Všechny vrstvy barvy jsem aplikoval pomocí stříkací pistole, a tak je výsledný nátěr proveden rovnoměrně a bez šmouh. Fotografie natřených plechů jsou také součástí přílohy D.

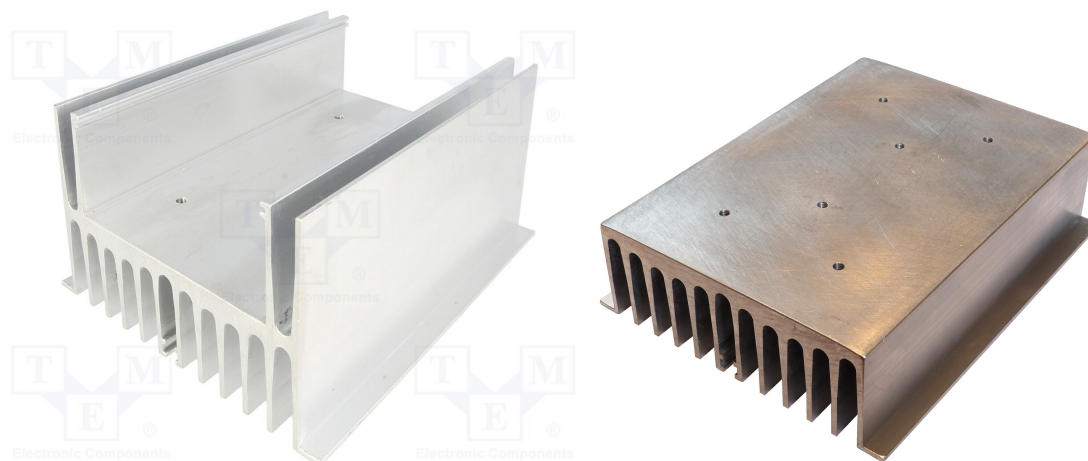
3.2 Realizace chladicích sestav

Uspořádání chladicích sestav bylo popsáno v kapitole 2.1. Vzhledem k tomu, že ne všechny konstrukční části bylo možné sehnat v provedení, které by odpovídalo zamýšlenému účelu, musel jsem některé z nich dodatečně upravit.

Části, které si vyžádaly poměrně výrazné úpravy oproti stavu při zakoupení, byly vnější chladiče. Z dostupných chladičů jsem vybral chladič [63], jehož zamýšleným účelem je chlazení polovodičových SSR relé. Z tohoto důvodu je vybaven celkem šesti předvrtanými otvory se závity pro uchycení zmiňovaného relé. Čtyři z nich budou následně využity pro přichycení celé chladicí sestavy k příčkám skříně komory. Chladič má mnou požadované žebrování po celé délce vnější strany, nicméně na straně opačné, kde se bude nacházet Peltierův modul, má ještě na okrajích čtyři žebra, jak je vidět v levé části obrázku 3.2. Tyto žebra jsem musel odbrousit, aby bylo možné chladič umístit do požadované polohy blízko příčce. Výsledný tvar chladičů dokumentuje pravá část obrázku 3.2. Oba vnější chladiče si vyžádaly ještě další specifické úpravy, spočívající ve vyříznutí částí některých žeborů na jejich vnější straně. Z důvodů minimalizace vnějších rozměrů komory totiž chladiče zabírají téměř celé postranní sekce skříně komory. V nich se ale také nachází vnitřní části jednotlivých komponent uživatelského rozhraní a také napájecích prvků. Z rozměrové analýzy jsem zjistil, že by při neupravení chladičů došlo k jejich kolizi s napájecí autozásuvkou a také přívodními vodiči přepínače režimu činnosti komory *Chlazení/Ohřev*. Proto jsem v žebrech obou chladičů vytvořil zářezy nutné pro bezkolizní umístění výše zmíněných komponent. Fotografie dokumentující realizované výřezy jsou součástí přílohy D.

K adekvátně upraveným vnějším chladičům jsou pomocí teplovodivého lepidla přilepeny Peltierovy moduly. Umístění modulů je voleno přímo uprostřed základnové plochy chladičů, aby se tak teplo z Peltierových modulů mohlo šířit stejnoměrně do všech stran. Konkrétní orientace modulů není podstatná, protože

komora bude umožňovat jak chlazení, tak ohřev. Ve mnou realizovaném modelu teplotní komory jsou Peltierovy moduly přilepeny k vnějším chladičům stranou s potiskem, čemuž následně odpovídá i příslušné značení připojovacích kontaktů na navržené DPS. Zvolená orientace Peltierových modulů má za následek, že se při připojení kladného napájecího napětí na kladný (červený) vodič modulu bude komora ohřívat. Na vnějším chladiči je následně nalepena izolační podložka, která zajistí, že se chladič nebude přímo dotýkat přičky, k níž bude přichycen, a také bude rezervovat volný prostor pro vyvedení vodičů nejen od Peltierových modulů.



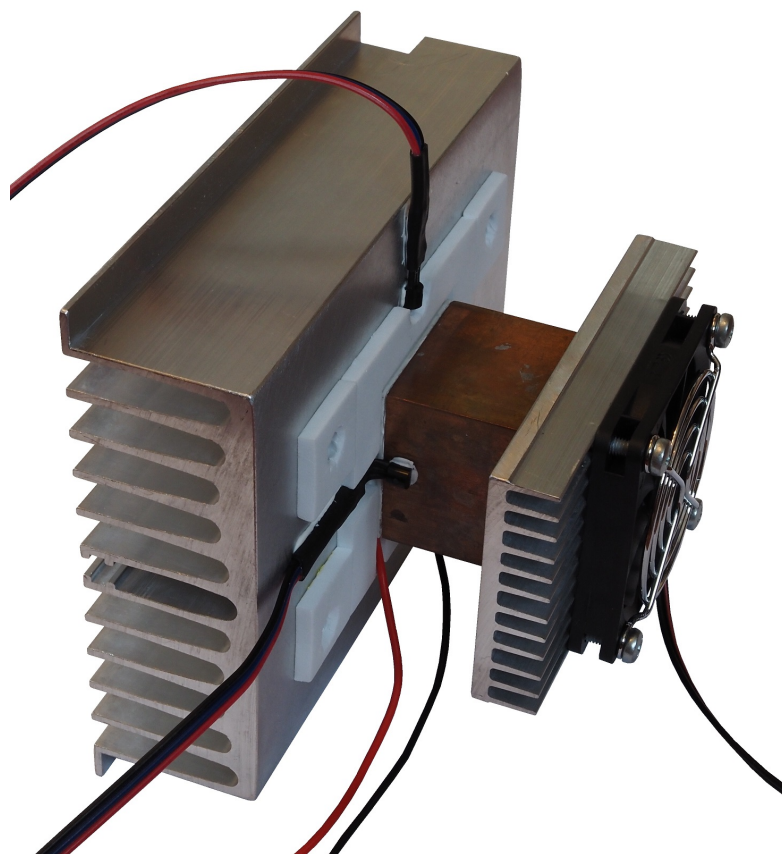
Obrázek 3.2: Vnější chladič před [63] a po úpravě

Druhá strana Peltierových modulů je prodloužena pomocí měděných bloků do vnitřního prostoru teplotní komory skrz izolaci. Bloky jsou k modulům také přilepeny pomocí teplovodivého lepidla. Měděné bloky bylo třeba před přilepením patřičně vyhladit, aby co nejlépe přiléhaly k Peltierovým modulům. Na druhém konci měděných bloků jsem vyvrtal symetricky v rozích čtyři otvory o průměru 2,5 mm hluboké přibližně 8 mm, do kterých jsem následně pomocí závitníků vyřízl metrický závit M3. Tyto závity budou sloužit pro přichycení vnitřního chladiče po vyhotovení izolační stěny, kterou chladič sestava prochází. Fotografie vyhlazeného měděného bloku s otvory pro přichycení vnitřních chladičů je možné nalézt v příloze D.

Po vytvrnutí teplovodivého lepidla jsem mohl k již zalepeným Peltierovým modulům přilepit senzory teploty jejich stran. Teplotu vnější strany Peltierova modulu bude vyhodnocovat senzor, který je přilepen na základně vnějšího chladiče naproti příslušnému otvoru v plechové přičce. Druhý senzor teploty vnitřní strany Peltierova modulu jsem původně přilepil na okraj měděného bloku těsně u Peltierova modulu. Po celkové kompletaci komory a jejím vyzkoušení jsem ale zjistil, že navržené umístění je nevhodné. Teplota vyhodnocovaná senzorem byla vyšší než očekávaná, což bylo způsobeno parazitním ohřevem senzoru od tepla vyzařovaného vnějším chladičem. Umístění senzoru jsem tedy musel změnit. Ve výsledném modelu teplotní komory je senzor přilepen k měděnému bloku cca 0,5 cm od vnitřního chladiče (na obrázku 3.3 je senzor umístěn ještě v původní poloze).

Pro přichycení vnitřních chladičů k měděným blokům bude využito rozebíratelného spojení pomocí šroubů. Pro ty bylo třeba vyvrtat odpovídající otvory v základně vnitřních chladičů tak, aby šrouby nekolidovaly s jednotlivými chladičovými žebry. Část sousedních žeborů okolo výše zmíněných děr jsem následně mírně

vybrousil, čímž jsem dosáhl skrytí šroubů v profilu chladiče. Šrouby tak nijak nebrání přichycení vnitřního ventilátoru přímo na vnitřní chladič. Šrouby uchycující chladič k měděnému bloku jsou doplněny podložkou, jejímž prostřednictvím budou zapřeny právě o vybroušená žebra. Ve vnitřním chladiči jsem následně vyvrtal další čtyři otvory o průměru 3,2 mm. Do nich jsem poté vyřízl závit M4 pro šrouby, kterými bude k chladiči přichycen vnitřní ventilátor společně s mřížkou. Zkušebně sestavená vnitřní a vnější část chladičí sestavy je na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Chladičí sestava před zabudováním

3.3 Výroba DPS

Plošný spoj bude vyroben ze standardního jednovrstvého laminátu FR4. Pro jeho výrobu jsem zvolil metodu odleptání mědi z míst nezakrytých maskou v lázni roztoku chloridu železitého. Masku (viz příloha B, schéma 2) jsem nejprve vytiskl na tonerové tiskárně na speciální teplovzdorný lesklý papír. Z něj jsem pak pomocí žehličky přenesl masku na předem odmaštěnou desku plošného spoje. Nepotřebný papír jsem následně odmočil ve vodní lázni a jeho zbytky důkladně odstranil z desky, na které poté zůstala pouze přenesená maska plošného spoje.

Před samotným leptáním bylo třeba v masce proškrábnout všechny požadované mezery mezi jednotlivými spoji, u kterých mohlo dojít vlivem žehlení k nežádoucímu spojení. K tomuto kroku jsem použil schéma DPS ze strany spojů (viz příloha B, schéma 3). Dále jsem také musel lihovým fixem dokreslit některé části masky, které se při přezehlování nepřenesly zcela korektně. Posledním krokem před

vyleptáním masky byla její úprava zohledňující navržené spoje vedoucí pod některými nezapojenými piny operačních zesilovačů a mikrokontroléru detailně popsána v kapitole 2.2.7. U pinů č. 5 operačních zesilovačů označených ve schématu jako IC_5 a IC_6 jsem tedy odstranil pájecí plošku a nahradil ji požadovanou vodivou cestou. Podobnou úpravu jsem provedl také u pinů **PC_14** a **PC_15** mikrokontroléru. Následně jsem již mohl desku vyleptat. Po dokončení leptání a odstranění masky jsem znovu zkontroloval správnost spojů s pomocí schématu 3 a případné nepřesnosti jsem opravil opět proškrábnutím daného místa. Následně jsem vyvrtal všechny otvory vrtáky odpovídajících průměrů a zabrousil hrany výsledné desky.

Na vyleptanou desku jsem poté ze strany součástek doplnil popisky jednotlivých konektorů. Dále jsem také podbarvil skupiny konektorů shodného typu pro přehlednější připojování příslušných komponent. Podle schématu 4 v příloze B jsem již popsanou DPS osadil součástkami. Při osazování jsem postupoval od malých součástek k větším. Tím jsem si usnadnil práci, neboť jsem jednotlivé součástky nemusel přidržovat v místě jejich umístění, protože byly opřené o desku stolu. Před osazení patič integrovaných obvodů jsem adekvátně odstranil odpovídající nezapojené piny, k jejichž zapájení nebyla vyvrtána příslušná díra, protože je v jejím místě veden jiný spoj. Jako poslední jsem osadil spínací tranzistory, které jsou k desce přišroubovány. Tranzistor T_2 je přišroubován přímo k desce šroubem $M3 \times 5$. Z druhé strany desky se tak nachází standardní podložka M3 a matka M3 uchycující jeho přípevňovací šroub. Výkonové tranzistory T_9 , T_{10} , T_{11} a T_{12} jsou opatřeny malými chladiči. Mezi chladičem a tranzistorem je nanesena tenká vrstva teplovodivé pasty snižující tepelný odpor spojení. Chladič je připevněn k tranzistoru šroubem $M3 \times 8$, který je zajištěn matkou M3 přímo u chladiče. Druhá matka M3 doplněná o standardní podložku M3 pak drží chladič s tranzistorem přichycený k DPS. Tranzistory jsou tak umístěny cca tři milimetry nad samotnou deskou, čímž je minimalizován jejich případný ohřev od desky. Po zapájení veškerých součástek jsem ještě pocínoval spoje, kterými budou protékat velké proudy, a následně jsem desku opatřil antikoročním lakem, pro zabránění její oxidaci v průběhu času.

Do patič kompletně osazené desky jsem nakonec umístil příslušné integrované obvody. Vzhledem k malé výšce prostoru pro DPS ve skříni teplotní komory bylo nutné mírně upravit připojení mikrokontroléru. Ten je osazen v dutinkových lištách pro umožnění jeho snadného vyjmutí. Díky tomu je tak zajištěn dostatečný odstup mikrokontroléru od desky, a tak jsem z něj mohl odstranit plastové vymezovače umístěné na spodních řadách jeho kolíkových lišt. Dále jsem také zkrátil piny na horní straně destičky mikrokontroléru, aby při případném mírném prohnutí zadní stěny komory nedošlo k jejich zkratování.

Fotografie dokumentující realizovaný plošný spoj včetně detailu zobrazujícího provedení barevného značení jednotlivých konektorů jsou v příloze D.

3.4 Realizace izolované teplotní komory

Poslední částí, kterou bylo třeba vyrobit před finálním složením celého systému s teplotní komorou, byla izolovaná komora. Ta, jak již bylo uvedeno v kapitole 2.3.2, sestává z 30mm stěn tvořených vždy třemi vzájemně slepenými 10mm deskami z polystyrenu. Jednotlivé stěny a dno jsou tvořeny vždy dvě deskami shodných rozměrů a třetí deskou, která je záměrně menší pro vytvoření tzv. zámků jednotlivých stěn. Víko je pak tvořeno ze tří shodně velkých desek. Rozměry jed-

notlivých desek pro vyhotovení požadovaných dílů stěn, dna a víka, jejichž vzájemné provázání je znázorněno na obrázku 2.17 v kapitole 2.3.2, jsou uvedeny v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2: Rozměry polystyrenových desek pro sestavení izolované komory

označení dílu izolované komory	velikost dílu [mm]	počet kusů
víko	242×175	3
dno	204×195	2
dno	204×155	1
stěna levá, stěna pravá	195×130	4
stěna levá, stěna pravá	155×100	2
stěna přední, stěna zadní	204×110	4
stěna přední, stěna zadní	184×100	2

Zakoupenou polystyrenovou desku o rozměrech 1250×600 mm jsem tedy nejprve nařezal na jednotlivé díly požadovaných rozměrů. Odpovídající desky pak bylo třeba slepit pro získání dílů tvořících izolovanou teplotní komoru. K tomuto účelu jsem bohužel nemohl použít běžně dostupná univerzální lepidla ani speciální lepidla na polystyren, protože ta vyžadují, aby byl druhý lepený povrch savý. To v případě všech potřebných spojů typu polystyren – polystyren, polystyren – plast ani polystyren – kov neplatí. Ke slepení polystyrenových desek a také k vyhotovení dalších výše zmíněných typových spojů jsem tak použil silikon coby univerzální transparentní tmel. Jeho hlavní výhodou pro mnou uvažované použití je jeho dobrá přilnavost k neporézním materiálům a také dobrá odolnost vůči vyšším teplotám, díky čemuž nebude docházet k jeho degradaci ani v blízkosti chladicích sestav.

Po zaschnutí lepených spojů jednotlivých dílů ostění izolované komory jsem do levé a pravé stěny vyřízl otvor pro průchod chladicí sestavy do vnitřního prostoru komory. Pod otvorem pro chladicí sestavu v obou stěnách jsem pak propíchl malý kruhový otvor pro napájecí vodiče vnitřních ventilátorů. Dále jsem také vyhloubil malé jamky pro všechny šrouby, které budou vyčnívat z plechových dílů, k nimž budou izolované stěny přiléhat. V předním horním rohu levé a pravé izolační stěny jsem následně vyhotovil obdélníkový výřez dosahující přibližně dvou třetin tloušťky celé stěny. Do vzniklého prostoru jsem následně umístil oba koncové spínače, které budou detekovat zavřené víko komory. Před jejich zalepením do stěn jsem ale musel vyměnit pérka v nich umístěná. Původní pérka totiž vyžadovala pro sepnutí spínače působení poměrně velké síly, kterou víko teplotní komory vlastní vahou nedokázalo vyvinout. Proto jsem je vyměnil za slabší pérka z běžné propisovací tužky, která lze stlačit mnohem snadněji. Po této úpravě jsem mohl koncové spínače definitivně zalepit do stěn komory pomocí tavné tyčky.

Uprostřed dílu tvořícího zadní izolační stěnu jsem zabudoval senzor teploty v komoře. Senzor jsem původně zapustil do malé komůrky pod úrovní vnější plochy stěny, čímž byl chráněn před případným poškozením předměty umístěnými v komoře. Dále jsem také předpokládal, že tento prvek bude mít pozitivní vliv na konzistentnost vyhodnocení teploty v komoře, kdy senzor nebude přímo vystaven proudu chladného případně teplého vzduchu vyfukovaného z vnitřních chladiců vnitřními ventilátory. Tento předpoklad se ale ukázal být mylný. Po vyzkoušení

funkčnosti zkompletované teplotní komory senzor nevykazoval téměř žádné změny hodnoty teploty a to i po delší době činnosti komory. Musel jsem tedy najít jinou polohu senzoru, která by zajistila správné vyhodnocení teploty a zároveň příliš neblokovala vnitřní prostor komory. Senzor jsem se rozhodl umístit mírně nad úroveň izolační stěny. V různých polohách na stěně jsem následně zjišťoval správnost vyhodnocované teploty s využitím digitálního teploměru umístěného v komoře. Nejlepších výsledků dosahoval senzor při umístění cca 4,5 cm od levé izolační stěny komory, kdy odchylka jím měřené teploty byla při vyšších rozdílech teploty vně a uvnitř komory maximálně 1 až 2 °C od hodnoty teploty měřené uprostřed komory pomocí digitálního teploměru. Fotografie, z nichž je patrné původní a upravené umístění teplotního senzoru a způsob zabudování koncových spínačů, jsou součástí přílohy D.

Po vyhotovení jednotlivých částí ostění izolované komory včetně komponent v nich zapuštěných jsem se pustil do výroby krycích plastových desek, které na ně budou přilepeny. Krycí desky vrchního okraje spodní (nepohyblivé) části teplotní komory budou vždy mírně přesahovat do prostoru teplotní komory. Deska kryjící stěnu komory pak bude pod tímto přesahem těsně schovaná a na okraji komory nevznikne další hrana. V horních krycích deskách levé a pravé stěny jsem vyvrtal malé kruhové otvory, skrz které budou vyčnívat hmatníky koncových spínačů. Krycí deska zadní stěny pak obsahuje kruhový otvor pro přívod vzduchu z komory k zabudovanému teplotnímu senzoru. Plastové desky kryjící zvedací víko teplotní komory bylo nutné v jejich zadní části patřičně vyříznout, aby nebránily plynulému otáčení pantů a zvedání víka. Také čelní stranu izolačního panelu víka jsem musel mírně seříznout, aby při zvedání víka nekolidovala s přední stěnou skříně komory. Všechny plastové desky jsem následně přilepil pomocí silikonu k jednotlivým polystyrenovým dílům.

3.5 Finální kompletace modelu teplotní komory

Po dokončení výroby jednotlivých dílčích částí systému teplotní komory jsem mohl přistoupit k jejich kompletaci. Prvním krokem před zahájením finální montáže, který jsem provedl, bylo připravení veškerých propojovacích vodičů a jejich opatření přípojovacími kontakty k DPS. K některým komponentům jsou vodiče přímo připájeny, u jiných jsou vybaveny přípojovacími konektory typu FASTON. Všechny pájené kontakty jsem následně zatavil do smršťovací bužírky pro zabránění jejich případnému spojení jednak s dalšími kontakty, jednak se skříní komory či jinými kovovými částmi systému. Konektory určené pro připojení k DPS jsem následně nabarvil barvami odpovídajícími těm, kterými jsem předtím zvýraznil kontakty shodného určení na DSP. Na každý nabarvený konektor jsem následně ještě tenkým lihovým fixem napsal označení komponenty, ke které vede vodič z něj vystupující.

Prvním celkem, který jsem zkompletoval, byla izolovaná komora spolu s chladicími sestavami. K dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá** jsem nejprve přišrouboval vnější část chladicích sestav pomocí čtveřice šroubů M4×8. Před jejich dotažením jsem ještě protáhl napájecí vodiče vnitřních ventilátorů skrz příslušné otvory v příčkách a izolačních stěnách, protože později by to již nebylo možné. Následně jsem k plechům **Příčka levá** a **Příčka pravá** přiložil příslušné stěny tvořící izolovanou komoru. Poté již bylo možné zkompletovat chladicí sestavy. Na měděné

bloky jsem nejprve nanesl tenkou vrstvou teplovodivé pasty a následně jsem k nim přišrouboval vnitřní chladiče pomocí šroubů $M3 \times 16$ doplněných o velké podložky $M3$. K vnitřním chladičům jsem pak přichytil vnitřní ventilátory včetně mřížek pomocí šroubů $M4 \times 27$. Taková velikost šroubů se ale nevyrábí, a tak jsem si dané šrouby musel vyrobit zkrácením běžně dostupných šroubů $M4 \times 30$. Ke dnu izolované komory jsem poté přilepil přední a zadní izolační stěnu. K provedení těchto spojů jsem na rozdíl od předchozích spojů použil tavnou tyčku, čímž jsem dosáhl rychlého vytvrnutí lepeného spoje. Poslední částí izolované komory, kterou bylo třeba upevnit, bylo víko. To je přilepeno silikonem k dílu **Víko zvedací**, ke kterému jsem předtím přišrouboval knoflíkový úchop šroubem $M4 \times 6$ a také jsem přimontoval otočné panty šrouby shodné velikosti doplněnými o standardní matku $M4$.

K dílu **Příčka vnitřní** jsem přišrouboval distanční sloupky $M4 \times 5$, ke kterým bude následně přichycena DPS. Sloupky jsou přišroubovány šrouby $M4 \times 4$ doplněnými o podložku $M4$. Poté jsem spojil díly **Dno**, **Příčka levá**, **Příčka pravá** a **Příčka vnitřní**. K uchycení dílů **Příčka levá** a **Příčka pravá** jsem použil šrouby $M4 \times 4$ zašroubované přímo do závitů ve zmiňovaných dílech. Díl **Příčka vnitřní** je kvůli výrobní chybě přišroubován šrouby $M4 \times 6$ zašroubovanými do matek $M4$.

Další částí, kterou bylo třeba zkompletovat před finální montáží, bylo víko skříně komory obsahující veškeré ovládací a indikační prvky uživatelského rozhraní. Nejprve jsem k dílu **Víko LCD** připevnil LCD panel. K desce LCD panelu jsou pomocí šroubů $M2,5 \times 5$ přišroubovány distanční sloupky $M2,5 \times 9$. U dílu **Víko LCD** se pak nachází destička z plexiskla, která chrání samotný LCD panel před vnějším poškozením. Druhá strana distančních sloupek je následně přišroubována také pomocí šroubů $M2,5 \times 5$ k dílu **Víko LCD** přes krycí plexisklo. Dále se na dílu **Víko LCD** nachází žluté tlačítko *Zobrazení LCD*, které je připevněno pomocí upevňovacího kroužku k tomu určenému. Po dokončení montáže komponentů na dílu **Víko LCD** jsem jej mohl spojit s připraveným dílem **Víko zvedací**. Spojení jsem provedl pomocí šroubů $M4 \times 6$ přichycujících druhé části otočných pantů. Šrouby nacházející se blíže dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá** jsou zašroubovány do ploché matky $M4$, zbylé dva jsou opatřeny standardní matkou $M4$. Mezi dílem **Víko LCD** a horním okrajem izolované komory se ovšem nachází mezera. Tu zakrývá oddělovací příčka, kterou jsem vyrobil z plastové desky a k dílu **Víko LCD** jsem ji připevnil pomocí tavné tyčky. Následně již bylo možné středovou část víka komory připevnit k dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá**. Ke spojení jsou použity čtyři šrouby $M4 \times 6$ zašroubované do matek $M4$. Matky naproti šroubům přichycujících otočné panty jsou ploché, zbylé dvě jsou pak standardní. Jak u šroubů, tak u matek jsou ještě doplněny podložky $M4$. Z víka komory pak bylo třeba realizovat ještě postranní panely. K těm jsem nejprve připevnil patřičné komponenty uživatelského rozhraní a následně jsem oba díly **Víko levé** i **Víko pravé** připevnil k dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá** pomocí šroubů $M4 \times 4$. Menší komplikace nastala u montáže indikačních LED, kde použité držáky nebyly vybaveny nějakým mechanismem, který by v nich tu kterou diodu přidržel. Proto jsem ze zvonkového drátu vyrobil zajišťovací mechanismus, který indikační LED diodu zafixuje v jejím držáku. Detail zajišťovacího mechanismu je na obrázku 36 v příloze D.

Následně jsem k DPS připojil plochý kabel sběrnice LCD. Ten je veden pod DPS pro snížení počtu křížení jednotlivých kabelů. Poté jsem DPS přišrouboval pomocí šroubů $M4$ doplněných podložkami $M4$ k připraveným distančním sloup-

kům na dílu **Příčka vnitřní**. Na příslušné konektory na DPS jsem posléze zapojil všechny přívodní vodiče od jednotlivých komponent systému. K dílu **Stěna zadní** jsem přimontoval napájecí prvky, k nimž jsem pak připojil odpovídající přívodní kabely. Před připevněním autozásuvky jsem nejprve musel umístit mřížku krytí průduchů pravého vnějšího chladiče. K tomu jsem z plastové desky vyrobil příložku, která je umístěna pod upevňovací matkou autozásuvky. Dále jsem také doplnil mřížku průduchů k elektronice, kterou jsem připevnil pomocí dvojice dílů **Příložka na síťka krytí průduchů k elektronice**. Následně jsem celý díl **Stěna zadní** přišrouboval k dílům **Příčka levá** a **Příčka pravá** pomocí šroubů M4×4, přičemž jsem také umístit mřížku krytí průduchů levé vnějšího chladiče.

K dílům **Stěna levá** a **Stěna pravá** jsem přišrouboval vnější ventilátory společně s mřížkami umístěnými na vnější straně skříně komory. K tomu jsem použil samořezné šrouby dodávané s ventilátory. Na mřížky jsem následně nacvaknul jejich krycí část obsahující filtr. Díly **Stěna levá** a **Stěna pravá** s upevněnými ventilátory jsem pak přišrouboval k dílům **Dno**, **Stěna zadní**, **Víko levé** a **Víko pravé** pomocí šroubů M4×4. Nakonec jsem připevnil díl **Stěna přední** k dílům **Stěna levá**, **Stěna pravá**, **Příčka levá** a **Příčka pravá** také pomocí šroubů M4×4. K průduchům vnějších chladičů jsem předtím také umístit krycí mřížky.

Připevněním dílu **Stěna přední** se stal model teplotní komory plně kompletním, což dokládá obrázek 3.4. Detailní fotografie dokumentující celkovou podobu realizovaného modelu teplotní komory jsou v příloze E.



Obrázek 3.4: Finální podoba modelu teplotní komory

Kapitola 4

Měření dosažených parametrů modelu teplotní komory

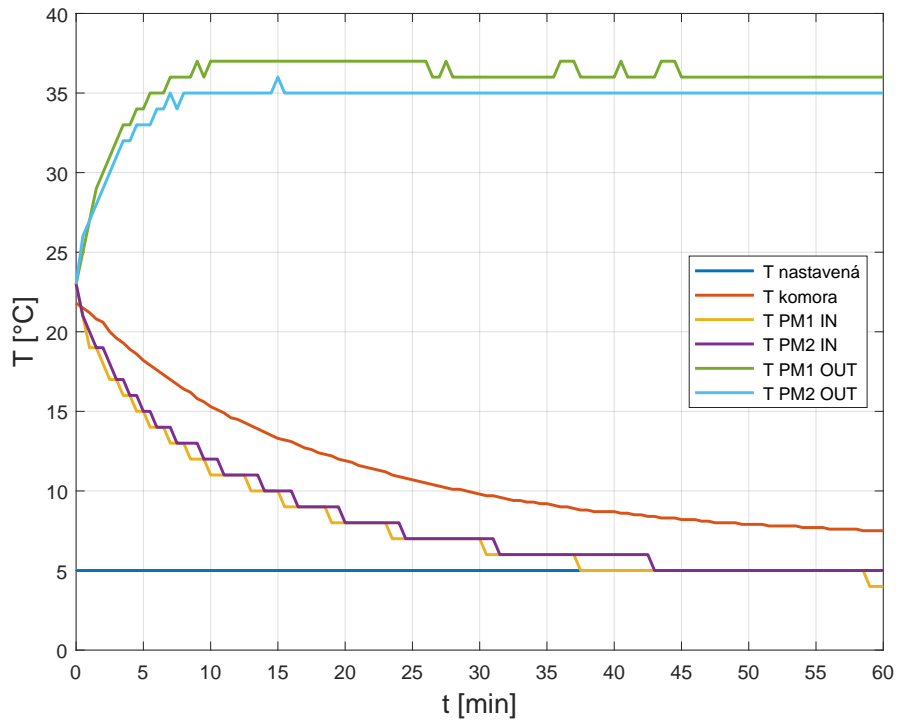
Po sestavení modelu teplotní komory a odstranění zjištěných nedostatků spočívajících v nevhodném umístění některých teplotních senzorů jsem mohl změřit parametry, kterých realizovaná komora dosahuje. Všechna měření jsem prováděl při okolní teplotě cca 23 °C. Určil jsem minimální a maximální dosažitelnou teplotu v komoře při pokojové teplotě okolního prostředí. Dále jsem provedl měření, jejichž účelem bylo zjistit přesnost regulace teploty a její hysterezi způsobenou teplotní setrvačností systému.

K záznamu měřených hodnot jsem původně chtěl využít propojení mikrokontroléru s počítačem, kdy by mikrokontrolér posílal naměřená data po sériové lince do PC. Sériový monitor v PC by pak zachycená data zaznamenával. Z uložených dat bych posléze vygeneroval patřičné grafické výstupy. Bohužel kvůli využití prakticky všech vstupně-výstupních pinů mikrokontroléru jsem tuto možnost využít nemohl, neboť pro sériovou komunikaci s PC se využívá pin **PA_2** [27], který jsem již měl obsazen jinou periferií. Hodnoty jsem tedy musel zaznamenávat ručně do připravených tabulek. Z testovacího měření jsem určil „vzorkovací interval“ odečítání hodnot teploty na 30 s, což je doba, která poskytuje dostatečně detailní průběh teploty a zároveň je v lidských silách stíhat bezchybně zapisovat požadované údaje.

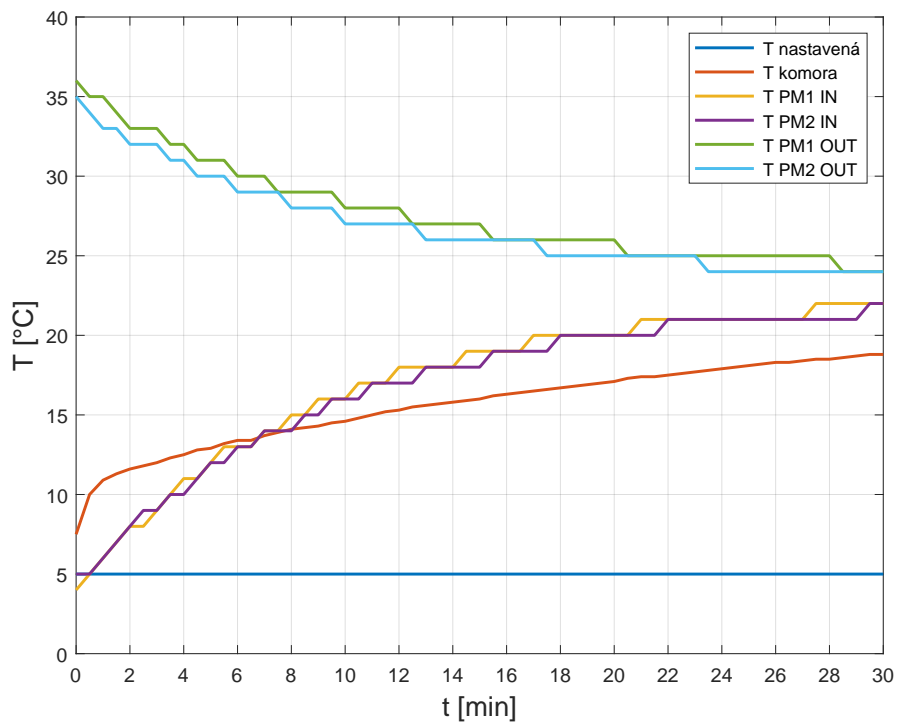
Pro zjednodušení práce jsem mírně upravil řídicí program, kdy jsem na displeji zobrazil hodnoty všech teplot současně, a tak jsem nemusel neustále přepínat zobrazení displeje. Tabulky změřených hodnot ze všech provedených měření jsou v elektronické příloze F.2. Níže uvedené grafy závislostí jednotlivých teplot na čase jsem ze změřených dat vygeneroval prostřednictvím matematického programu MATLAB.

4.1 Měření nejnižší dosažitelné teploty

Při měření nejnižší dosažitelné teploty jsem pomocí přepínače *Chlazení/Ohřev* přepnul komoru do režimu chlazení. Následně jsem nastavil požadovanou teplotu dostatečně nízko, aby nedošlo k vypnutí chlazení vlivem jejího dosažení. Po provedení této konfigurace jsem stiskl tlačítko *Povolení činnosti komory*, čímž jsem komoru uvedl do chodu. V 30s intervalech jsem pak zaznamenával všechny teploty systému, tj. teplotu v komoře a také teploty stran obou Peltierových modulů.



Obrázek 4.1: Graf závislosti jednotlivých teplot systému při měření nejnižší dosažitelné teploty



Obrázek 4.2: Průběh jednotlivých teplot systému po deaktivaci chlazení

Z naměřených dat (viz obrázek 4.1) je zřejmé, že teplota v komoře nejprve lineárně klesá rychlostí přibližně $0,7 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Postupem času se ale její průběh změnil na hyperbolický. Asymptota hyperbolického průběhu odpovídá hodnotě přibližně $7 \text{ }^\circ\text{C}$, což je nejnížší dosažitelná teplota v komoře při pokojové teplotě okolního prostředí. Dále je z grafu patrné, že vnější (horká) strana Peltierových modulů je chlazená na téměř konstantní teplotu $35 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplota vnitřních stran Peltierových modulů naopak stále klesá a to tak, že její hodnota je vždy přibližně o dva až čtyři stupně Celsia nižší než teplota v komoře.

Bezprostředně po dokončení měření nejnížší dosažitelné teploty jsem změnil ještě teplotní setrvačnost systému při vychlazené komoře. Po zapsání poslední hodnoty výše uvedeného měření jsem rozpojil spínač *Povolení činnosti komory*, čímž došlo k deaktivaci chlazení a řídicí systém tak pouze monitoroval hodnoty jednotlivých teplot. Ty jsem následně zapisoval opět s časovým rozmezím 30 s.

Výsledek měření teplotní setrvačnosti po deaktivaci chlazení je na obrázku 4.2. Teplota v komoře postupně narůstá. Změřená část jejího průběhu má ovšem spíše logaritmický charakter, i když lze předpokládat, že po dostatečně dlouhé době by se také ustálila na určité hodnotě. Vnější strana Peltierových modulů po odpojení napájení postupně chladne. Teplotní rozdíl vnitřní a vnější strany se také dále snižuje vlivem vyrovnávání teplot vedením tepla zpět ke vnitřní části chladičí sestavy.

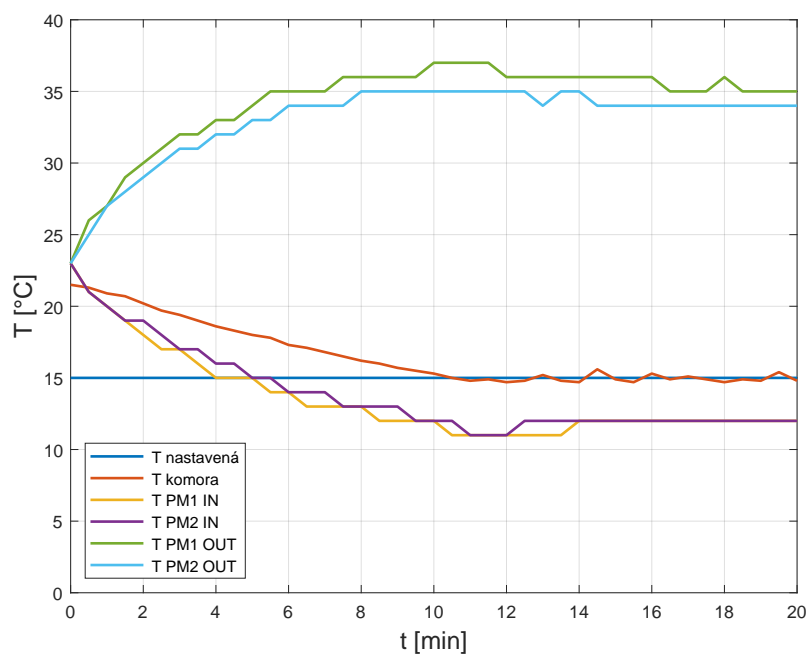
4.2 Měření regulace chlazení

Další charakteristiku, kterou jsem se rozhodl změřit, byla přesnost regulace teploty při režimu chlazení. Teplotu v komoře jsem nastavil na $15 \text{ }^\circ\text{C}$, tj. na hodnotu dostatečně vzdálenou nejnížší dosažitelné teplotě. Přepínač režimu činnosti jsem ponechal v poloze chlazení a po povolení činnosti komory jsem opět v 30s intervalech zaznamenával naměřené teploty. Bohužel se rozlišení 30 s mezi jednotlivými odečty ukázalo jako nedostačující pro určení hystereze, a tak jsem měření předčasně ukončil. Výsledný graf je možno vidět na obrázku 4.3.

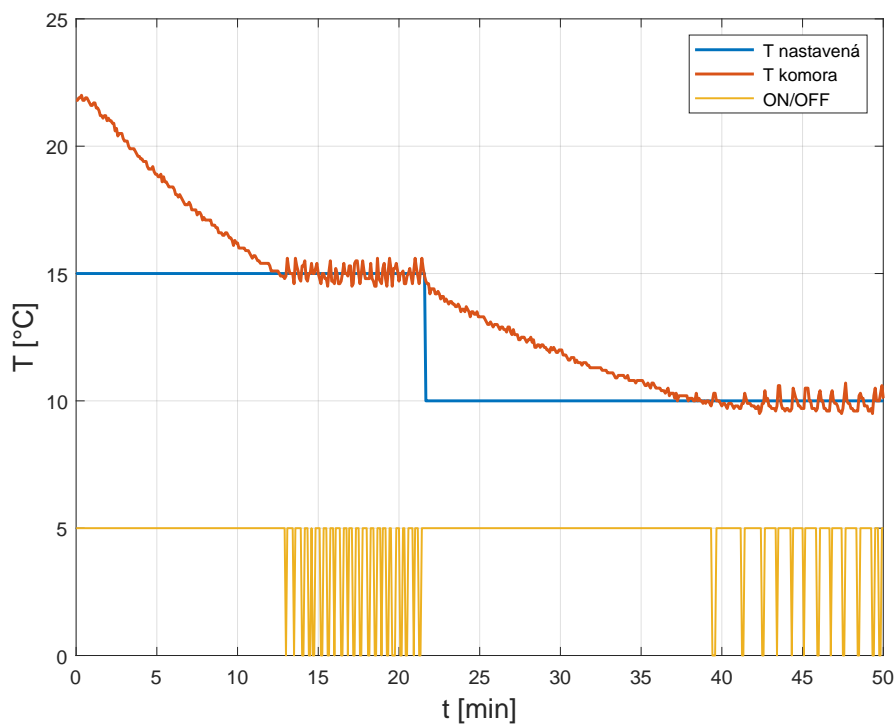
Abych mohl určit hysterezi udržování teploty v komoře, musel jsem odečítat data mnohem častěji. Vzhledem k tomu, že odečítat a zapisovat hodnoty v reálném čase v krátkých časových intervalech je neproveditelné, rozhodl jsem se pomocí fotoaparátu pořídit videozáznam činnosti komory. Z uloženého videozáznamu jsem následně s krokem 5 s zapisoval změřenou hodnotu teploty v komoře a také stav komory, který je vyjadřován pomocí indikační LED *Komora v činnosti*. V průběhu pořizování záznamu jsem ještě změnil nastavenou teplotu z $15 \text{ }^\circ\text{C}$ na $10 \text{ }^\circ\text{C}$, aby bylo možné porovnat rozdíly při udržování vyšší a nižší teploty v komoře.

Z grafu celého měření znázorněnému na obrázku 4.4 je dobře patrný charakteristický pokles teploty při počátečním chlazení na teplotu $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a taky po změně nastavené teploty a dochlazení na $10 \text{ }^\circ\text{C}$, který odpovídá průběhu získanému při měření nejnížší dosažitelné teploty (viz obrázek 4.1). Při udržování teploty $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a posléze také $10 \text{ }^\circ\text{C}$ je patrné kolísání teploty okolo nastavené hodnoty. Dále je také vidět, že spínání Peltierových modulů je prováděno častěji při udržování teploty $15 \text{ }^\circ\text{C}$ než při teplotě $10 \text{ }^\circ\text{C}$. Křivku znázorňující stav komory jsem ve všech následujících grafech upravil tak, aby šlo dobře rozeznat stav komory a také aby zbytečně neznehledňovala zobrazení podstatných informací v grafu. Proto je v některých grafech posunutá mimo nulovou úroveň a případně ještě přenásobená

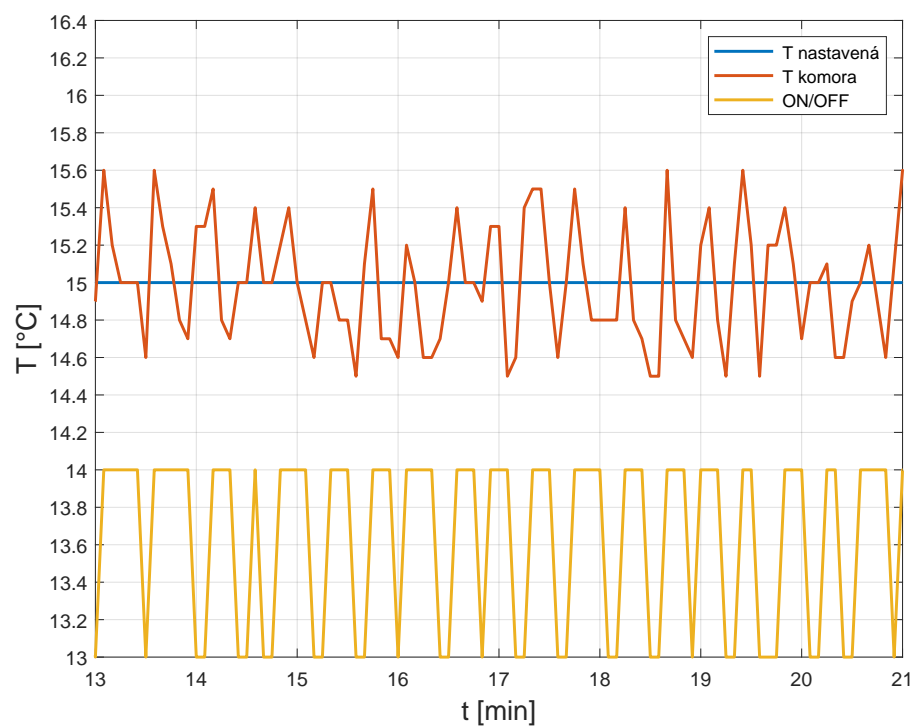
skalárem vyšším než jedna.



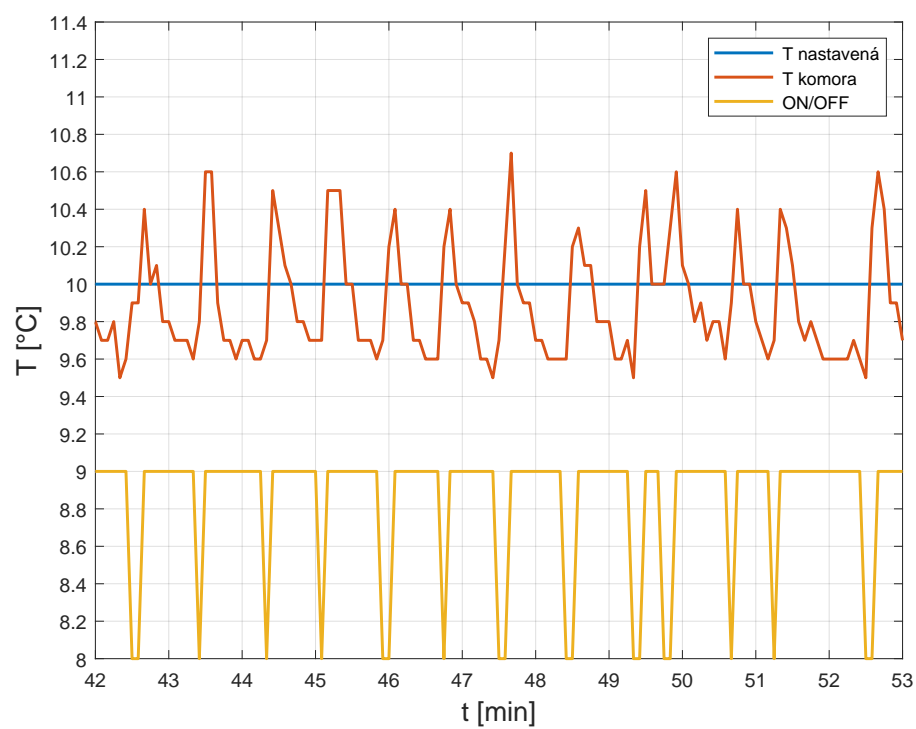
Obrázek 4.3: Průběh regulace chlazení s intervalem odečítání 30 s



Obrázek 4.4: Průběh regulace chlazení s intervalem odečítání 5 s a změnou požadované teploty v průběhu měření



Obrázek 4.5: Detail průběhu regulace chlazení s nastavenou teplotou 15 °C

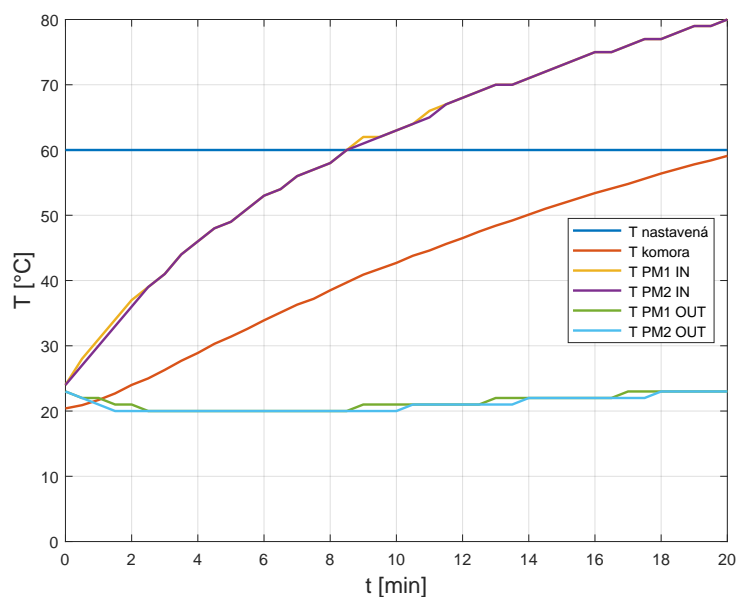


Obrázek 4.6: Detail průběhu regulace chlazení s nastavenou teplotou 10 °C

Z grafu 4.4 jsem vytvořil dva výřezy tak, aby bylo možné dobře určit hysterezi udržování teploty v komoře. Na obrázku 4.5 je patrný průběh udržování teploty 15 °C, na obrázku 4.6 pak 10 °C. Z porovnání obou detailních grafů je možné vyčíst informace o rozdílném chování komory. Při udržování teploty 15 °C jsou Peltierovy moduly opětovně spínány na relativně krátké intervaly, protože je snadnější udržet požadovanou teplotu v komoře. Oproti tomu při změně požadované teploty na 10 °C, je po vypnutí chlazení zřetelný rychlejší nárůst teploty. Peltierovy moduly jsou tak sepnuty na delší dobu než při udržování teploty 15 °C. Dalším důvodem vyššího poměru aktivního a neaktivního chlazení je také fakt, že při nižší nastavené teplotě je chladicí výkon komory nižší. Z obou grafů lze snadno vyčíst hysterezi udržování teploty v komoře. V obou případech se její hodnota pohybuje okolo jednoho stupně Celsia, což je dáno řídicím programem, který řídí spínání s hysterezí $\pm 0,5$ °C okolo nastavené teploty. Z pochopitelných důvodů vždy hodnota teploty v komoře po opětovném sepnutí Peltierových modulů mírně přesáhne programem nastavenou mez, což je způsobeno určitou teplotní setrvačností náběhu chlazení Peltierovými moduly.

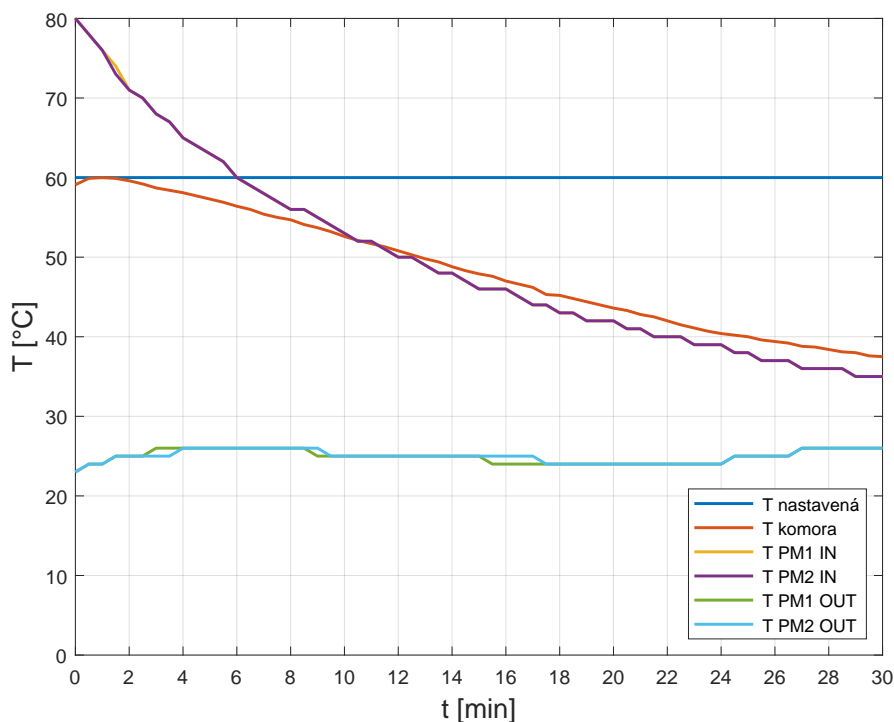
4.3 Měření nejvyšší dosažitelné teploty

Analogicky k měření nejnižší dosažitelné teploty jsem provedl i měření nejvyšší dosažitelné teploty v komoře. Mezi dokončením měření regulace chlazení a započítím měření nejvyšší dosažitelné teploty bohužel vypověděl senzor teploty vnitřní strany pravého Peltierova modulu (v grafech označen jako PM2). Vzhledem k velmi podobným měřeným hodnotám se senzorem vnitřní strany levého Peltierova modulu (označeného PM1), jsem ve všech následujících měřeních hodnotu T PM2 IN položil rovnou hodnotě T PM1 IN s tím, že jsem záměrně v některých bodech měření zavedl odchylku 1 °C, aby se obě křivky plně nepřekrývaly.



Obrázek 4.7: Graf závislosti jednotlivých teplot systému při měření nejvyšší dosažitelné teploty

Při měření nejvyšší dosažitelné teploty jsem přepnul komoru do režimu ohřevu a nastavil dostatečně vysokou teplotu, aby nedošlo k vypnutí ohřevu při jejím dosažení. V průběhu měření jsem opět v 30s intervalech odečítal hodnoty měřených teplot a také jsem sledoval poměrně rychlý nárůst teploty vnitřních chladicích sestav. Měření jsem přerušil, jakmile teplota vnitřní strany levého Peltierova modulu dosáhla 80 °C. Z naměřených údajů (viz obrázek 4.7) je zřejmé, že vnitřní část chladicích sestav nezvládá dostatečně rychle odevzdávat teplo do prostoru komory, a tak by při nepřerušování měření teplota ještě stále stoupala¹. Nárůst teploty v komoře je téměř lineární. Na počátku měření teplota stoupala rychlostí 2,3 °C·min⁻¹, před jeho ukončením se tempo ohřevu snížilo na 1,5 °C·min⁻¹. Chlazení udržovalo teploty vnějších stran Peltierových modulů na hodnotě okolo 20 °C, kdežto vnitřní strany (resp. jedna strana s funkčním senzorem teploty) se velmi rychle ohřívaly.



Obrázek 4.8: Průběh jednotlivých teplot systému po deaktivaci ohřevu

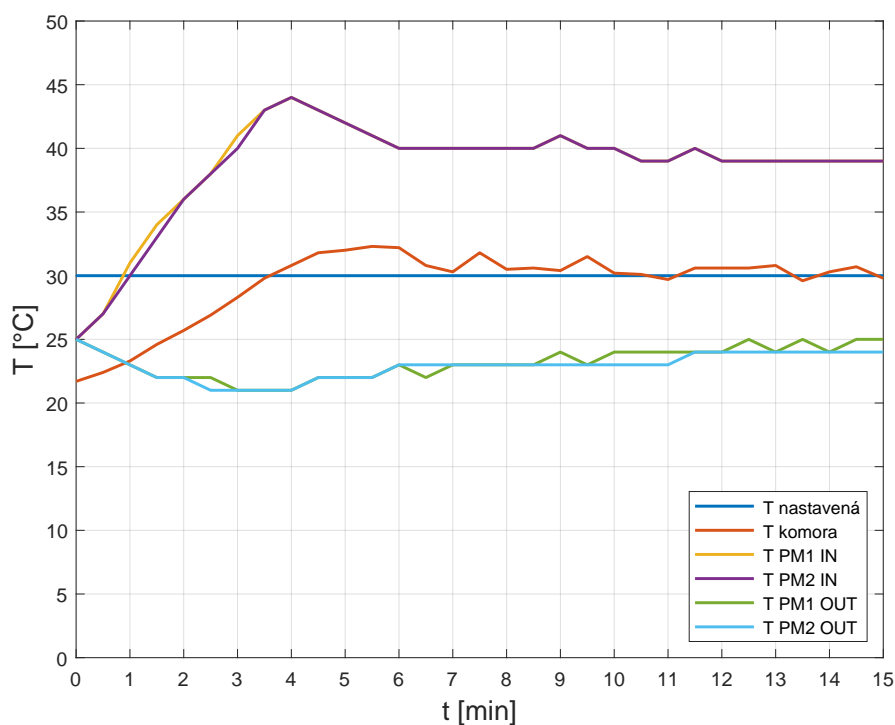
Po přerušení měření maximální dosažitelné teploty a deaktivaci ohřevu, jsem opět změřil teplotní setrvačnost ohřáté komory. Z výsledné změřené závislosti na obrázku 4.8 je patrné, že po deaktivaci ohřevu dochází ještě ke krátkodobému nárůstu teploty v komoře způsobeném stálou cirkulací vzduchu v komoře. Ta je způsobena nastavením řídicího programu, kdy při teplotách Peltierových modulů vyšších než 40 °C jsou ponechány v činnosti chladicí ventilátory i po deaktivaci ohřevu komory. Z grafu je také zřejmé, že teplota v komoře klesá přibližně stejným tempem, jako v případě měření teplotní setrvačnosti po deaktivaci chlazení stoupala (viz obrázek 4.2), tj. přibližně 0,6 °C·min⁻¹. Z toho lze vyvodit, že izolační

¹při libovolné teplotě přesahující 90 °C by byla činnost komory automaticky zablokována ochranným mechanismem řídicího programu

schopnosti komory jsou velmi podobné pro oba režimy činnosti. Tímto poněkud extrémním testem jsem také prověřil teplotní odolnost konstrukčního řešení izolované komory. Po ukončení výše zmíněných měření maximální dosažitelné teploty a následné teplotní setrvačnosti jsem provedl obhlídku stavu komory. Kromě mírného zvlnění krycích plastů izolované komory jsem neshledal žádné závady, čímž lze konstatovat, že komora byla navržena kvalitně a je schopná odolat i teplotám mimo rozsah pracovních teplot 5 až 40 °C.

4.4 Měření regulace ohřevu

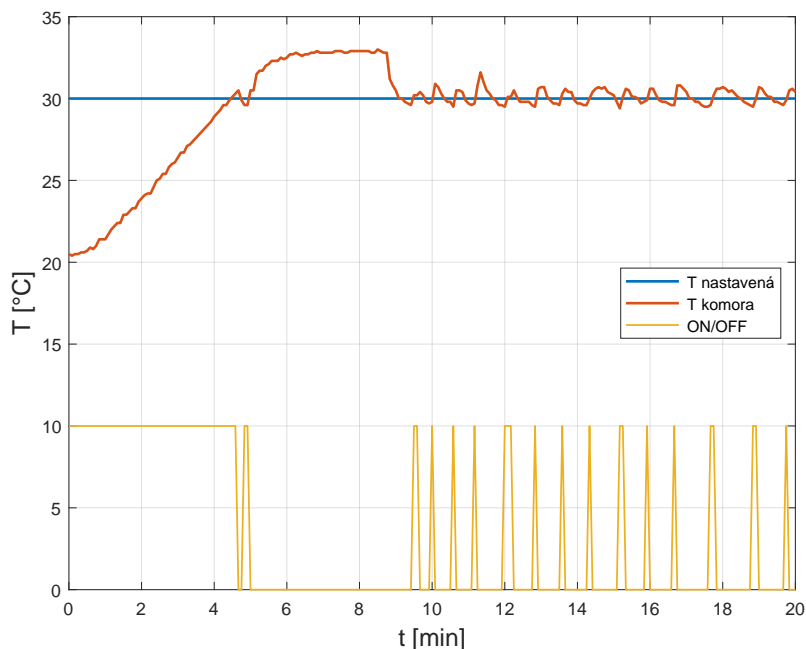
Posledním měřením, které jsem provedl, bylo měření přesnosti regulace ohřevu. Po vychladnutí komory po předchozím měření jsem nastavil teplotu na 30 °C a po stisku spínače *Povolení činnosti komory* jsem v intervalech 30 s odečítal změřené hodnoty jednotlivých teplot systému. Obdobně jako u měření regulace chlazení i zde nebylo rozlišení 30 s dostatečné pro určení hystereze udržení teploty, a tak je výsledkem toho měření pouze ilustrativní graf průběhu jednotlivých teplot znázorněný na obrázku 4.9.



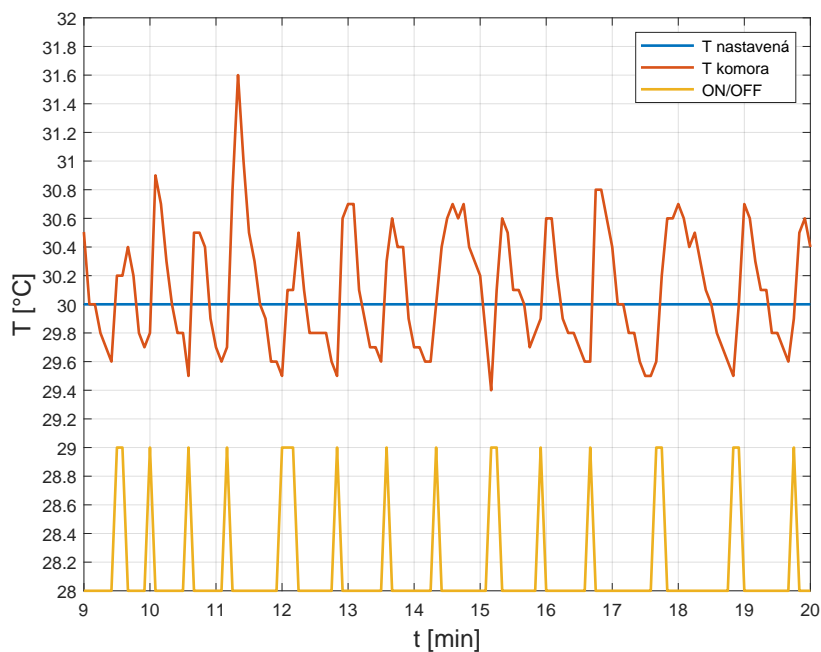
Obrázek 4.9: Průběh regulace ohřevu s intervalem odečítání 30 s

Provedl jsem tedy ještě jedno měření, při němž jsem pořizoval videozáznam. Z něj jsem poté odčítal změřenou hodnotu teploty v komoře v intervalech o délce 5 s a také stav komory indikovaný diodou Komora v činnosti. Výsledkem je již mnohem detailnější graf vyobrazený na obrázku 4.10. Změřený průběh teploty v komoře vykazuje poměrně výrazný překmit nad nastavenou hodnotu teploty po první deaktivaci ohřevu. Tento překmit je způsobem naakumulovanou tepelnou

energií ve vnitřních částech chladicích sestav, která je za pomoci vnitřních ventilátorů stále transportována do prostoru komory. Po dostatečném zchlazení vnitřních částí chladicích sestav a tím zajištěnému vypínání ventilátorů téměř bezprostředně po vypnutí ohřevu již k tomuto jevu nedochází.



Obrázek 4.10: Průběh regulace ohřevu s intervalem odečítání 5 s



Obrázek 4.11: Detail průběhu regulace ohřevu s nastavenou teplotou 30 °C

Dále jsem také vykreslil detailní graf (viz obrázek 4.11) ustálené části grafu celého měření, ze kterého je možné určit hysterezi udržování teploty v komoře. Zřejmě nejvýraznějším rozdílem detailního grafu regulace teploty oproti obdobnému grafu po regulaci chlazení je zcela opačný poměr aktivního a neaktivního stavu komory. Při chlazení na 15 °C byly tyto časy přibližně shodné a při chlazení na nižší teplotu 10 °C převažoval aktivní čas. Z grafu 4.11 je ale zřejmé, že při ohřevu je komora většinu času v nečinnosti a přihrívání při opětovném sepnutí Peltierových modulů trvá jen velmi krátce. Z detailního grafu na obrázku 4.11 lze také určit hysterezi udržování teploty při ohřevu. Ta je oproti hysterezi udržování teploty při chlazení mírně vyšší, protože po vypnutí ohřevu ještě krátce běží vnitřní ventilátory, které tak komoru dodatečně ohřejí. Zjištěná hodnota hystereze je při zanedbání překmitu krátce po jedenácté minutě měření cca 1,3 °C.

Kapitola 5

Ekonomická rozvaha

Náklady na sestavení prototypu teplotní komory se ve výsledku vyšplhaly na 6 536,61 Kč. Z toho připadá 3 571,28 Kč na elektronické součástky a další elektro komponenty. Zbývajících 2 965,33 Kč stály mechanické součásti komory. Kompletní seznam použitých součástek a materiálu je v elektronické příloze F.3. Níže jsou v tabulkách 5.1 a 5.2 uvedeny jen cenově významné položky. Uvedené ceny veškerých položek odpovídají přímým nákladům, tj. při koupi většího množství případně konstrukčních materiálů větších rozměrů je započítána jen cena té části, která byla k výrobě skutečně využita.

Práce na návrhu technického a konstrukčního řešení mi zabraly celkem 28 dní. Při uvážení průměrné denní čisté pracovní doby 6 hodin a cenně práce 150 Kč/hod vychází náklady na návrh komory 25 200 Kč. Vlastní výroba a následné zprovoznění včetně odstranění objevených nedostatků trvala 19 dní s tím, že průměrný pracovní výkon se blížil 8 hodinám. Cena manuální práce bývá obvykle nižší, a tak při ohodnocení pracovního výkonu cenou 120 Kč/hod získáme náklady na výrobu 18 240 Kč.

Při sériové výrobě většího množství teplotních komor by bylo možné některé výrobní procesy zautomatizovat, čímž by došlo k výraznému poklesu výrobních nákladů spojených s lidskou prací. Na druhou stranu by vznikly náklady na strojní výrobu skříňové zařízení, DPS a případně i izolované komory. Pro sériovou výrobu tedy můžeme počítat s výrobními náklady cca 4 000 Kč na jeden kus teplotní komory. Dále by při sériové výrobě bylo možné využít množstevních slev na nákup součástek i dalších konstrukčních prvků. Náklady na materiál by tak bylo možné snížit odhadem až na 60 % nákladů prototypu. Výrobní náklady na sériovou výrobu může pak vyjádřit vztahem

$$C = V + n \cdot (V + M), \quad (5.1)$$

kde C jsou celkové náklady na výrobu n kusů teplotních komor, N jsou jednorázové náklady na návrh, V jsou náklady na výrobu jednoho kusu a M je pořizovací cena materiálu a součástek pro výrobu jednoho kusu teplotní komory. Pokud by byla zahájena sériová výroba 1000 kusů teplotních komor, byly by celkové náklady na materiál a lidskou práci 7 947 166 Kč. Cena jednoho kusu teplotní komory tak vychází přibližně 8 000 Kč. Při započítání marže 25 % by bylo možné komory prodávat s cenou 10 000 Kč za kus.

Tabulka 5.1: Seznam použitých cenově významných součástí

popis	jednotková cena [Kč]	množství [ks]	celková cena [Kč]
analogový teplotní senzor	29,00	4	116,00
číslicový teplotní senzor	120,00	1	120,00
mikrokontrolér	334,00	1	334,00
Peltierův modul 60 W	139,00	2	278,00
ventilátor 120mm	169,00	2	338,00
ventilátor 60mm	152,58	2	305,16
DC/DC měnič	106,41	1	106,41
rail-to-rail operační zesilovač	43,98	4	175,92
výkonový tranzistor N-MOSFET	33,66	2	67,32
výkonový tranzistor P-MOSFET	88,96	2	177,92
alfanumerický LCD 2×24 znaků	417,69	1	417,69
dvoutlačítkový spínač	73,18	1	73,18
tlačítkový spínač	82,97	1	82,97
tlačítko kulaté zelené	94,13	2	188,25
tlačítko kulaté žluté	79,28	1	79,28
autozásuvka	82,00	1	82,00
pojistkové pouzdro	110,00	1	110,00
ostatní			579,18
celkem			3 571,28

Tabulka 5.2: Seznam použitého cenově významného materiálu

popis	jednotková cena [Kč]	množství [ks]	celková cena [Kč]
těsnicí kroužek + přichytka tlačítek	25,00	3	75,00
objímka LED	22,00	4	88,00
silikon transparentní (310 ml)	79,90	1	79,90
vnější chladič Peltierova modulu	277,14	2	554,28
vnitřní chladič Peltierova modulu	131,61	2	263,22
měděný blok 40×40×33 mm	266,00	2	532,00
plastová deska 297×210×1 mm	18,90	4	75,60
polystyren XPS 1250×600×10 mm	99,00	1	99,00
mřížka na ventilátor 120mm	66,17	2	132,33
ocelový plech 600×1000×1 mm	399,00	1	399,00
vodou ředitelná matná barva Denas	217,55	1	217,55
ostatní			449,45
celkem			2 965,33

Závěr

V práci byla nejprve rozebrána problematika termoelektrických jevů a jejich fyzikální podstata. Dále byl popsán princip činnosti Peltierova článku ve funkci tepelného čerpadla. Rešeršní část práce zmiňuje také jiné práce zabývající se zejména problematikou konstrukce teplotní komory s využitím Peltierových modulů.

Hlavní náplní práce byl kompletní návrh systému řízení teploty využívající k její regulaci právě Peltierovy moduly. Navržená teplotní komora o objemu cca 2 dm³ umožňuje jak chlazení tak i ohřev izolovaného prostoru. Při návrhu byl kladen důraz na minimalizaci rozměrů výsledného zařízení a také na jeho estetickou stránku. Řízení komory je zajišťováno pomocí mikrokontroléru, který zpracovává jednak povely od uživatele zadávané prostřednictvím ovládacích tlačítek, jednak údaje o teplotách systému snímané pomocí teplotních senzorů. Na základě získaných údajů pak mikrokontrolér řídí činnost komory, kdy dynamicky přepíná režimy činnosti chlazení, ohřev a nečinnost. Pomocí senzorů teploty je měřena zejména aktuální teplota v komoře, dále je také vyhodnocována teplota vnitřní i vnější strany obou 60W Peltierových modulů zajišťujících chlazení i ohřev vnitřního prostoru komory. Peltierovy moduly jsou na obou svých stranách vybaveny chladiči, které jsou pro lepší odvod tepla ofukovány ventilátory. Všechny podstatné informace o aktuálním stavu komory jsou uživateli předávány pomocí dvouřádkového alfanumerického displeje a také prostřednictvím čtyř indikačních LED.

Další část práce se věnuje výrobě modelu navržené teplotní komory. Zařízení je uloženo v kovové skříni, čímž je zajištěna jeho robustnost. Izolovaná komora je vyrobena z polystyrenu a pro zvýšení její odolnosti proti mechanickému poškození je přeplátována tenkými platovými deskami. Celé zařízení je koncipováno jako plně rozebíratelné, což se ukázalo jako velmi výhodné ve chvíli, kdy jsem byl nucen změnit původně nevhodné umístění některých teplotních senzorů.

Důležitou částí práce je také zjištění parametrů, kterých realizovaná teplotní komora dosahuje. Byla zjištěna nejnižší i nejvyšší dosažitelná teplota v komoře při okolní pokojové teplotě. Komeru je možné vychladit až na teplotu 7 °C. Naopak při ohřevu jsem omezil maximální nastavitelnou teplotu na 40 °C, aby při používání komory nedošlo k poškození systému vysokými teplotami, které jsem zaznamenal při zkušebním měření. Dalšími důležitými měřeními, která byla provedena, jsou měření zjišťující přesnost regulace jak v režimu chlazení, tak v režimu ohřevu. V obou režimech vykazuje komora hysterezi udržování nastavené teploty přibližně 1 °C s tím, že mírně vyšší přesnosti regulace dosahuje v režimu chlazení.

Na závěr práce je pak uvedena ekonomická rozvaha, ve které jsou rozebrány náklady na výrobu prototypu teplotní komory. Dále je také zvážena možnost sériové výroby a určena přibližná prodejní cena teplotní komory.

Literatura

- [1] HEJTMÁNEK, Jiří a Petr LEVINSKÝ. Termoelektrický jev. *Fyzikální ústav AV ČR* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/vyzkum/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev>
- [2] ČERVENKA, Milan a Ladislav SIEGER. Měření na Peltierově článku. *Laboratorní cvičení z fyziky* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://planck.fel.cvut.cz/praktikum/downloads/navody/peltier.pdf>
- [3] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Termoelektrické články. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/909-termoelektricke-clanky>
- [4] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Seebeckův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/910-seebeckuv-jev>
- [5] LEE, Gordon. Basic principles of thermocouples. *Embedded* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <https://www.embedded.com/basic-principles-of-thermocouples/>
- [6] LASANCE, Clemens J. M. The Seebeck Coefficient. *Electronics Cooling* [online]. [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/the-seebeck-coefficient/>
- [7] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/911-peltieruv-jev>
- [8] Thermoelectric effect. *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect
- [9] NEWMAN, David. The Peltier Effect and Thermoelectric Cooling. *David Newman's page* [online]. [cit. 2021-11-28]. Dostupné z: http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html
- [10] KUBINA, Pavel. Regulace teploty pomocí Peltierových termoelektrických modulů. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/regulace-teploty-pomoci-peltierovych-termoelektricky-modulu-2005_11_30765_720/
- [11] FAQ's & Technical Information. *TE Technology* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: <https://totech.com/faqs/>

- [12] BELL, Lon E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems. *Science* [online]. 2008, 321(5895), 1457-1461 [cit. 2021-11-28]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: [doi:10.1126/science.1158899](https://doi.org/10.1126/science.1158899)
- [13] GROMOV, G. Thermoelectric Cooling Modules. *Global photonics applications & technology* [online]. [cit. 2021-12-31]. Dostupné z: https://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf
- [14] DISALVO, Francis J. Thermoelectric Cooling and Power Generation. *Science* [online]. 1999, 285(5428), 703-706 [cit. 2021-11-28]. ISSN 0036-8075. Dostupné z: [doi:10.1126/science.285.5428.703](https://doi.org/10.1126/science.285.5428.703)
- [15] ZHAO, Dongliang a Gang TAN. A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2014, 66(1-2), 15-24 [cit. 2021-12-31]. ISSN 13594311. Dostupné z: [doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074)
- [16] MIRMANTO, M. Experimental performances of a thermoelectric cooler box with thermoelectric position variations. *Engineering Science and Technology, an International Journal* [online]. 2019 [cit. 2021-12-31]. ISSN 22150986. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jestch.2018.09.006](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.09.006)
- [17] SUNDAYANI. PID temperature controlling of thermoelectric based cool box. *2017 International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCREC)* [online]. IEEE, 2017, 2017, 236-240 [cit. 2021-12-31]. ISBN 978-1-5386-1667-3. Dostupné z: [doi:10.1109/ICCEREC.2017.8226671](https://doi.org/10.1109/ICCEREC.2017.8226671)
- [18] SHARMA, Sudhanshu, V.K DWIVEDI a S.N. PANDIT. Exergy analysis of single-stage and multi stage thermoelectric cooler. *International Journal of Energy Research* [online]. 2014, 38(2), 213-222 [cit. 2022-02-20]. ISSN 0363907X. Dostupné z: [doi:10.1002/er.3043](https://doi.org/10.1002/er.3043)
- [19] PANDEY, Purnendu Shekhar. The Real-Time Hardware Design and Simulation of Thermoelectric Refrigerator System Based on Peltier Effect. *Proceeding of International Conference on Intelligent Communication, Control and Devices* [online]. 2017 [cit. 2021-12-31]. Advances in Intelligent Systems and Computing. ISBN 978-981-10-1707-0. Dostupné z: [doi:10.1007/978-981-10-1708-7_66](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1708-7_66)
- [20] FAIRUZ REMELI, Muhammad et al. Experimental study of a mini cooler by using Peltier thermoelectric cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 788(1) [cit. 2021-12-31]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/788/1/012076](https://doi.org/10.1088/1757-899X/788/1/012076)
- [21] WINARTA, Adi et al. Experimental study of thermoelectric cooler box using heat sink with u-shape heat pipe and methanol working fluid. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2021, 1034(1) [cit. 2021-12-31]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/1034/1/012033](https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012033)

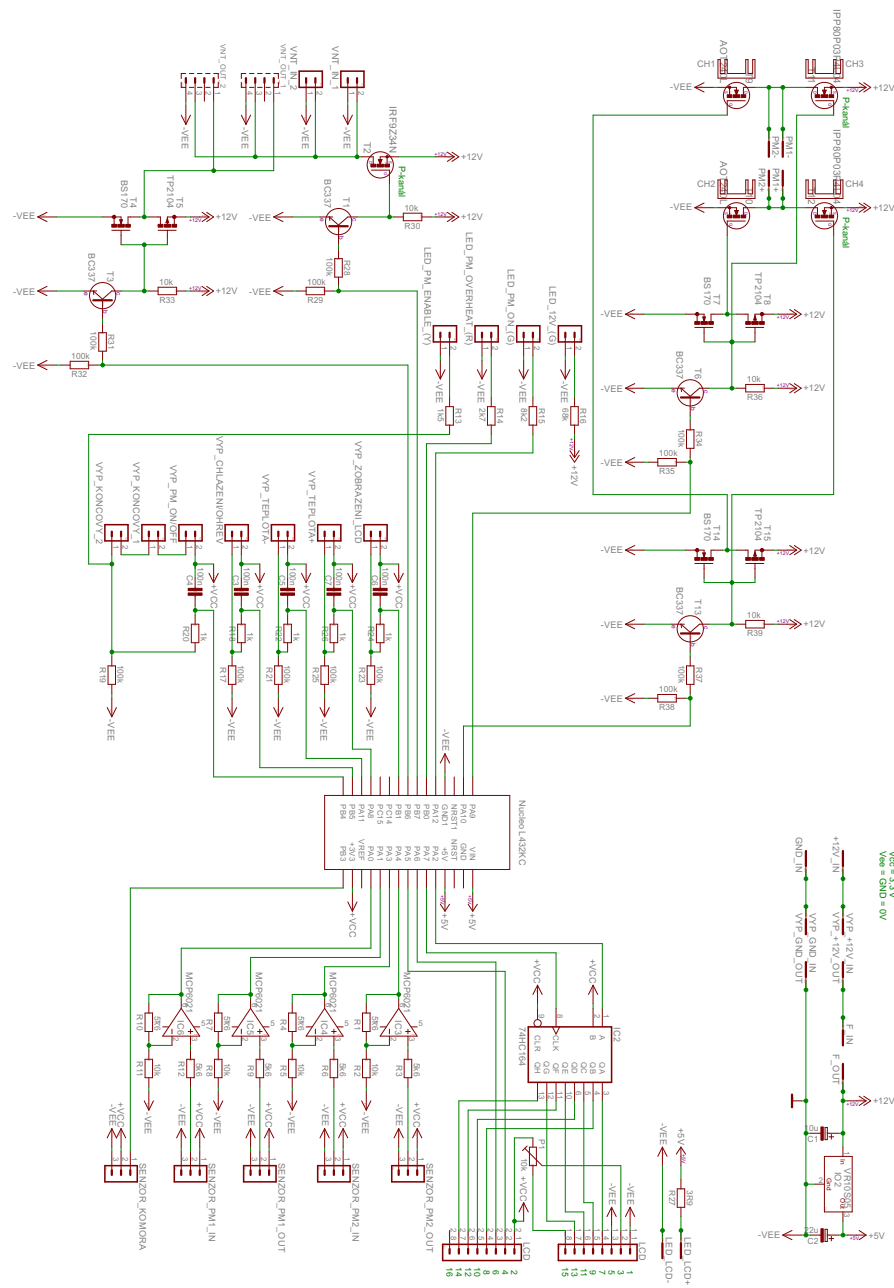
- [22] ABDUL-WAHAB, Sabah A. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renewable Energy* [online]. 2009 [cit. 2021-12-31]. ISSN 09601481. Dostupné z: [doi:10.1016/j.renene.2008.04.026](https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.026)
- [23] FADZLY, M K et al. Portable Water Cooler with Water Heater Using Thermoelectric and Arduino Uno And Powered Using Power Bank. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 864(1) [cit. 2021-12-31]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: [doi:10.1088/1757-899X/864/1/012216](https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012216)
- [24] MENG, Fangfang. Investigation of Thermoelectric Warm Air Heater. *Energy Procedia* [online]. 2015, 75, 621-626 [cit. 2021-12-31]. ISSN 18766102. Dostupné z: [doi:10.1016/j.egypro.2015.07.470](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.470)
- [25] KNÍŽEK, Karel. Termoelektrické jevy: Seebeckův a Peltierův efekt. Fyzikální ústav AV ČR [online]. [cit. 2021-11-21]. Dostupné z: https://www.fzu.cz/~knizek/pdf/Dvere2017_historie.pdf
- [26] Katalogový list TEC1-12706. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.601-034.1.pdf>
- [27] UM1956 User manual: STM32 Nucleo-32 boards (MB1180). *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00231744-stm32-nucleo-32-boards-mb1180-stmicroelectronics.pdf
- [28] Katalogový list spínaného zdroje VR10S05. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/a72efaa6c41fe48287827ea1bbf94bde/VR10-DTE.pdf>
- [29] Switch Bounce and How to Deal with It. *All about circuits* [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/switch-bounce-how-to-deal-with-it/>
- [30] Katalogový list tranzistoru BC337-40. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.210-131.1.pdf>
- [31] Katalogový list tranzistoru TP2104. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/20be912f73c053b66818f935d9e9f6e8/tp2104.pdf>
- [32] Katalogový list tranzistoru BS170. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-008.2.pdf>
- [33] Katalogový list tranzistoru IPP80P03P4L04. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/aca417041094655cf9b023bc0763210/IPx80P03P4L-04.pdf>
- [34] Katalogový list tranzistoru AOT240L. *Alpha & Omega Semiconductor* [online]. [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: http://www.aosmd.com/res/data_sheets/AOT240L.pdf
- [35] Katalogový list tranzistoru IRF9Z34N. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-05-06]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-218.1.pdf>

- [36] Katalogový list ventilátoru MF60101V3-A99-A. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/b3af7de98506f3fdc0be77b2dd419fca/MF60101V3-A99-A.pdf>
- [37] Arctic P12 SLIM PWM PST, 120mm. *CZC* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://www.czc.cz/arctic-p12-slim-pwm-pst-120mm/310735/produkt>
- [38] P12 Slim PWM PST. *Arctic* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://support.arctic.de/p12slimpwmpst>
- [39] Katalogový list senzoru teploty LM19. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.530-151.1.pdf>
- [40] Katalogový list senzoru teploty SMT172. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.969-074.1.pdf>
- [41] STM32L432KB STM32L432KC. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l432kc.pdf>
- [42] HOSPODKA, Jiří. *Reálné vlastnosti operačního zesilovače* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: http://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/soubory/oz_re.pdf
- [43] Katalogový list operačního zesilovače MCP6021. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/e53df4b1836c376b19d8bc3b9f170709/mcp6021.pdf>
- [44] Katalogový list LCD. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/63af8edd9294183126a640ef90ed0496/RC2402A-FHY-CSV.pdf>
- [45] LED backlight & LCD color matching list. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://www.tme.eu/Document/0e5094927beb0f841dea92648aef9c36/Raystar_backlight%26color%20matching.JPG
- [46] Katalogový list SIPO registru 74HC164. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.425-047.1.pdf>
- [47] Katalogový list řadiče ST7066U. *Newhaven Display* [online]. [cit. 2022-03-11]. Dostupné z: https://www.newhavendisplay.com/app_notes/ST7066U.pdf
- [48] Free open source IoT OS and development tools from Arm. *Mbed* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/>
- [49] Development boards. *Mbed* [online]. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/>
- [50] NUCLEO-L432KC. *Mbed* [online]. [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-L432KC/>

- [51] STM32 Nucleo-32 development board with STM32L432KC MCU, supports Arduino nano connectivity. *STMicroelectronics* [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-l432kc.html>
- [52] Powering a NUCLEO-L432KC with an external source. *Mbed* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/questions/77388/Powering-a-NUCLEO-L432KC-with-an-externa/>
- [53] PlatformIO IDE. *Visual Studio Marketplace* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://marketplace.visualstudio.com/items?itemName=platformio.platformio-ide>
- [54] Katalogový list tlačítek MCS 18. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/8d906c9bfbd01d95f0f4483781ccb589/MCS18-DTE.pdf>
- [55] Katalogový list dvoutlačítkového spínače R13-537A-01-R/G. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/46123b0762d4a2b2e8c42f906cccc56e/r13-537.pdf>
- [56] Katalogový list spínače H8300ABBB. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/932713e70c45ca482cb922e9edcad551/8300.pdf>
- [57] Katalogový list objímky LED. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.624-148.1.pdf>
- [58] Katalogový list autozásuvky DS-1011. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.899-384.1.pdf>
- [59] Katalogový list pojistkového pouzdra T0347RA. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.829-021.1.pdf>
- [60] Katalogový list vypínače RS-201-1C3-R. *GM electronic* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.631-465.1.pdf>
- [61] Extrudovaný vs. expandovaný polystyren – kde jsou rozdíly. *Stavím bydlím* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://stavimbydlim.cz/extrudovany-vs-expandovany-polystyren-kde-jsou-rozdily/>
- [62] Austrotherm Polystyren XPS TOP 30 GK, 125 x 60 x 1 cm. *OBI* [online]. [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.obic.cz/penove-izolace/austrotherm-polystyren-xps-top-30-gk-125-x-60-x-1-cm/p/5840087>
- [63] RAD-SSR-P4357-150 STONECOLD. *Transfer Multisort Elektronik* [online]. [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/rad-ssr-p4357-150/chladice/stonecold/>

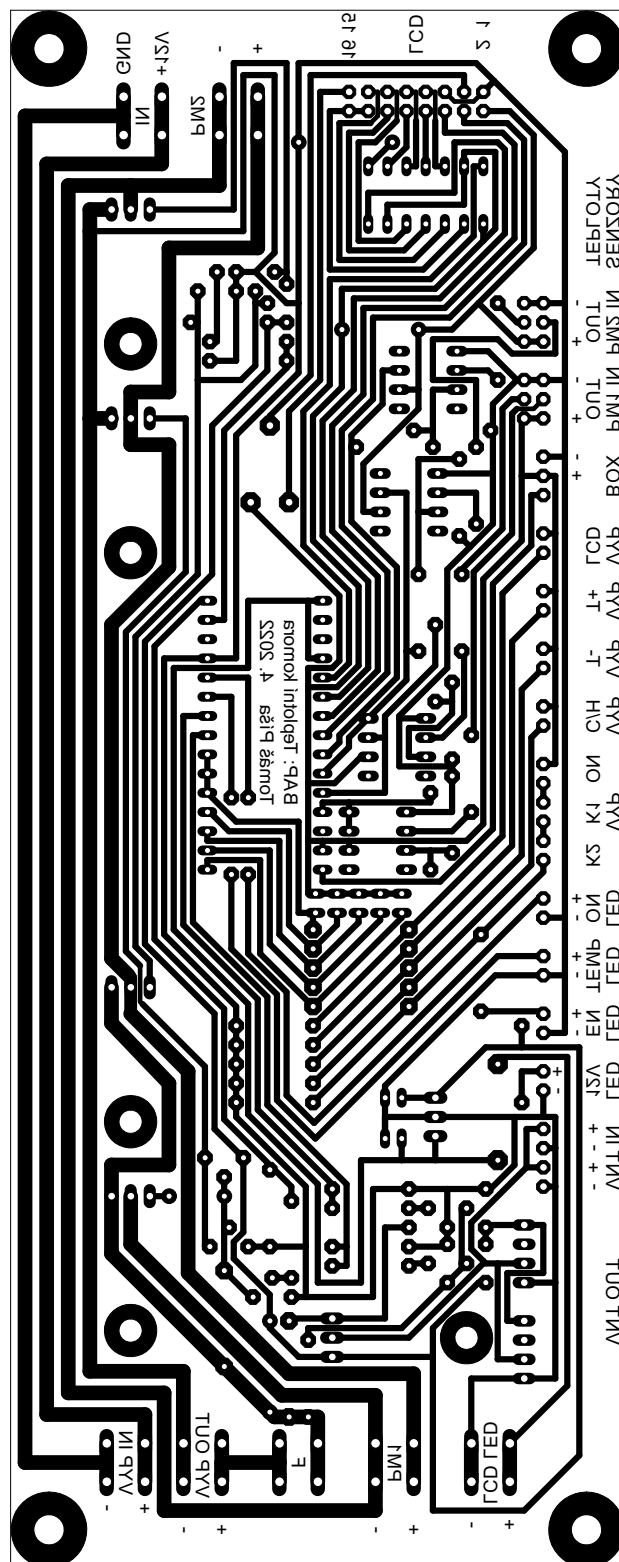
Přílohy

A Celkové schéma zapojení řídicí elektroniky

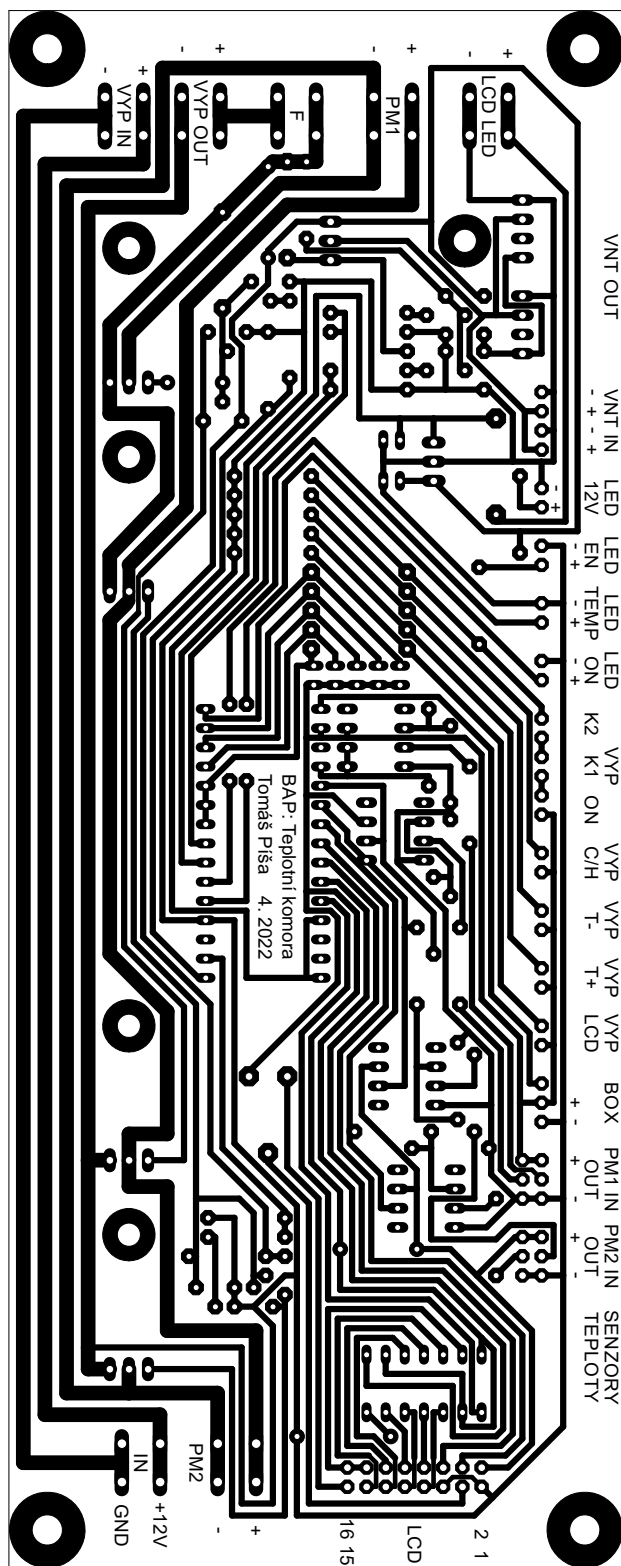


Obrázek 1: Celkové schéma zapojení řídicí elektroniky

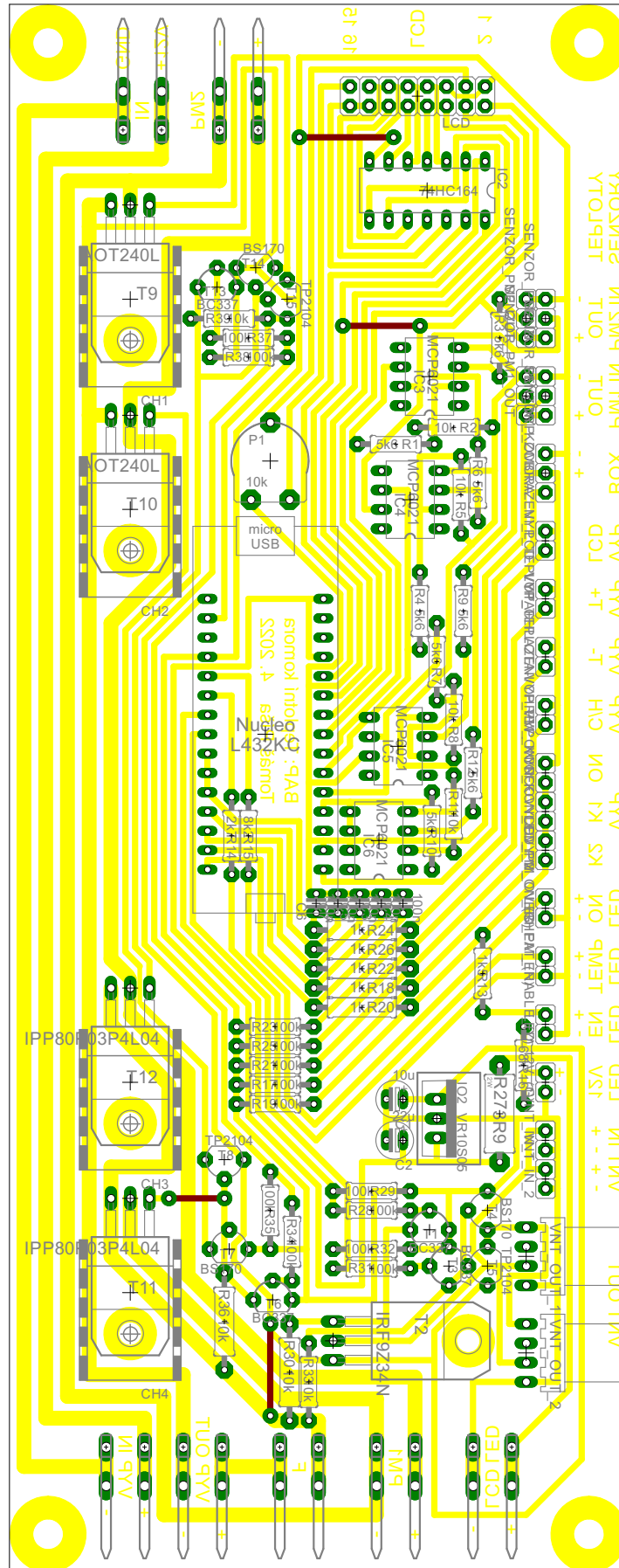
B Schémata pro realizaci plošného spoje



Obrázek 2: Šablona k vytisknutí pro výrobu DPS

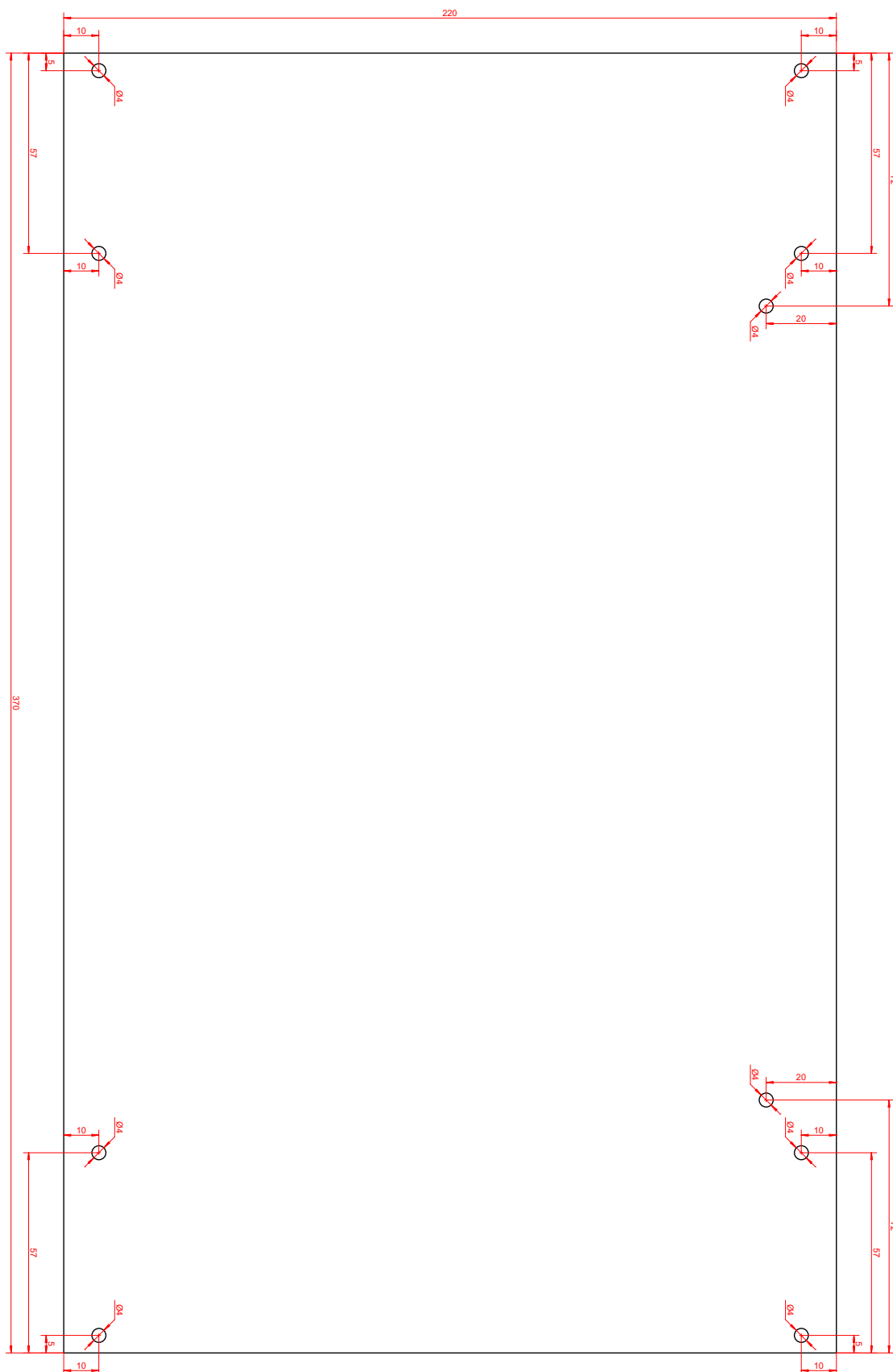


Obrázek 3: Pohled na DPS ze strany spojů

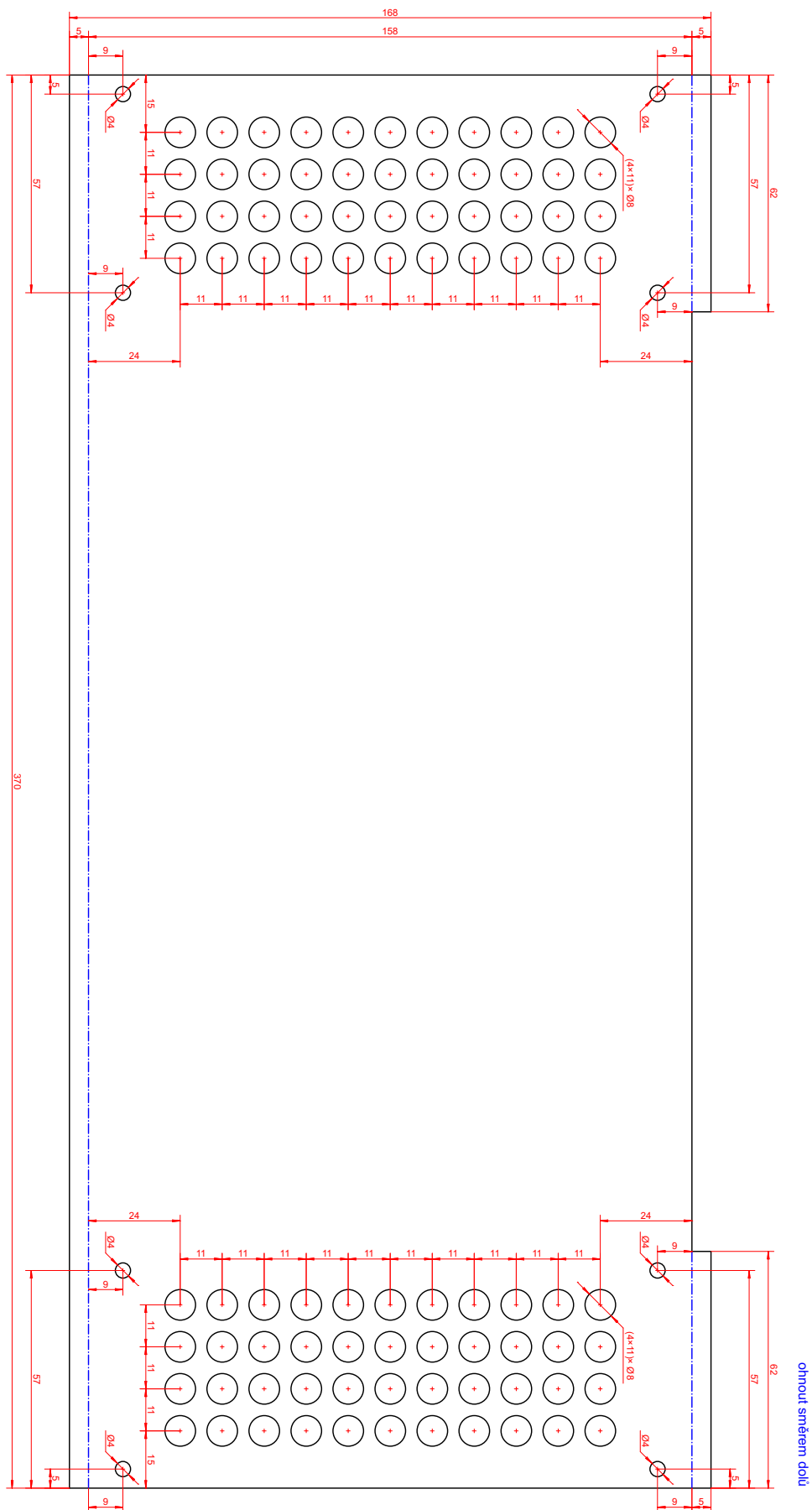


Obrázek 4: Pohled na DPS ze strany součástek (schéma pro osazení)

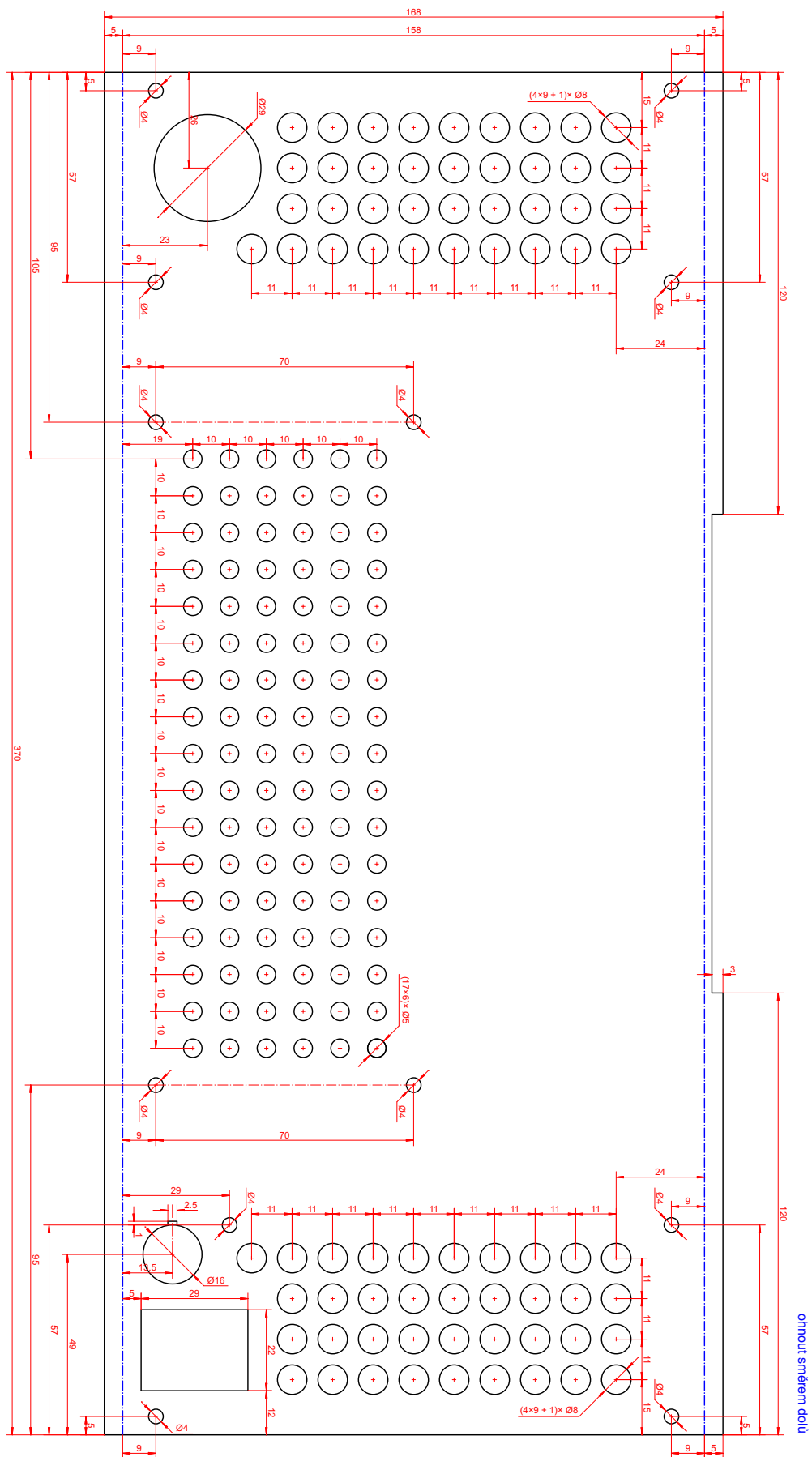
C Výkresy plechů tvořících skříň komory



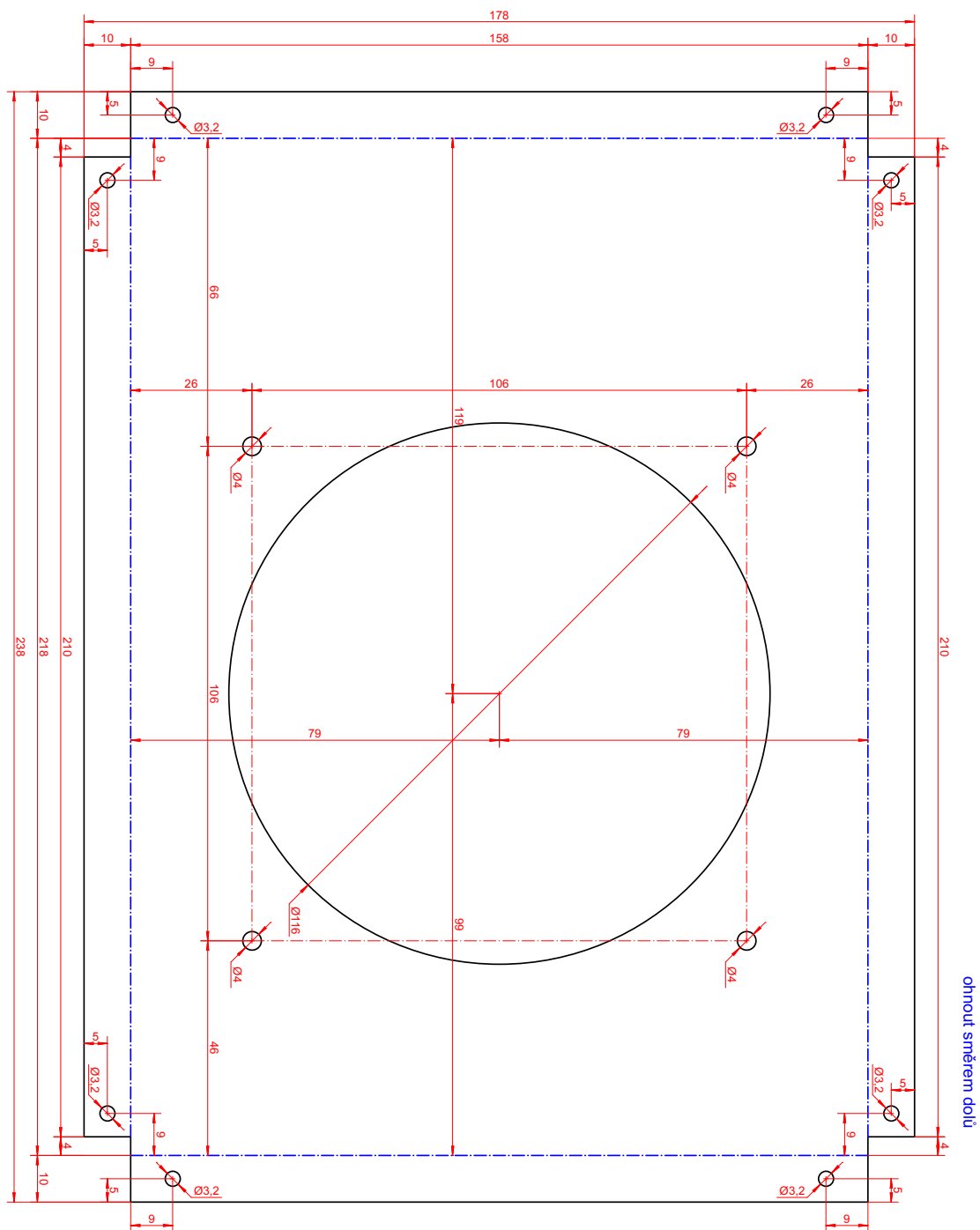
Obrázek 5: C.1 Dno



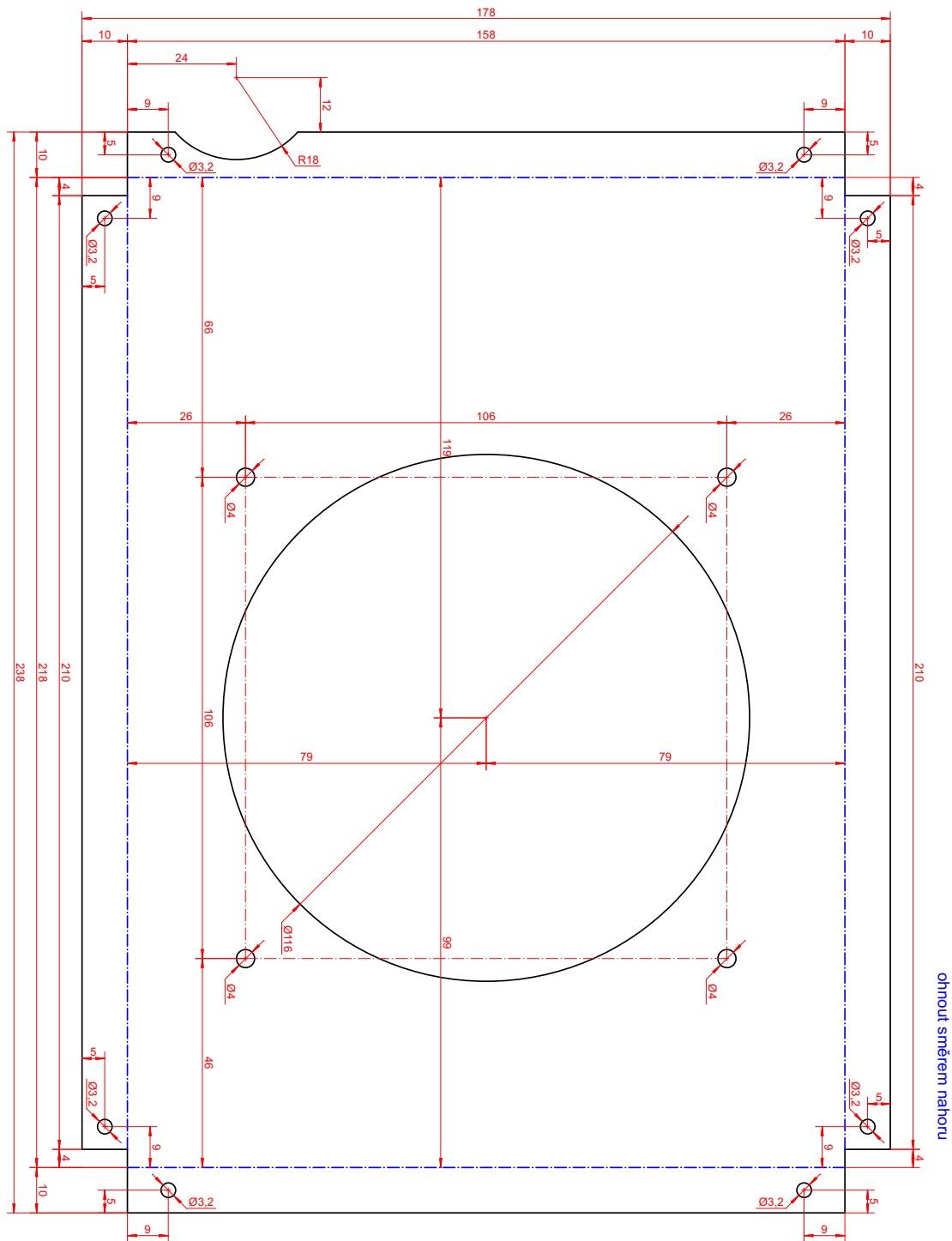
Obrázek 6: C.2 Stěna přední



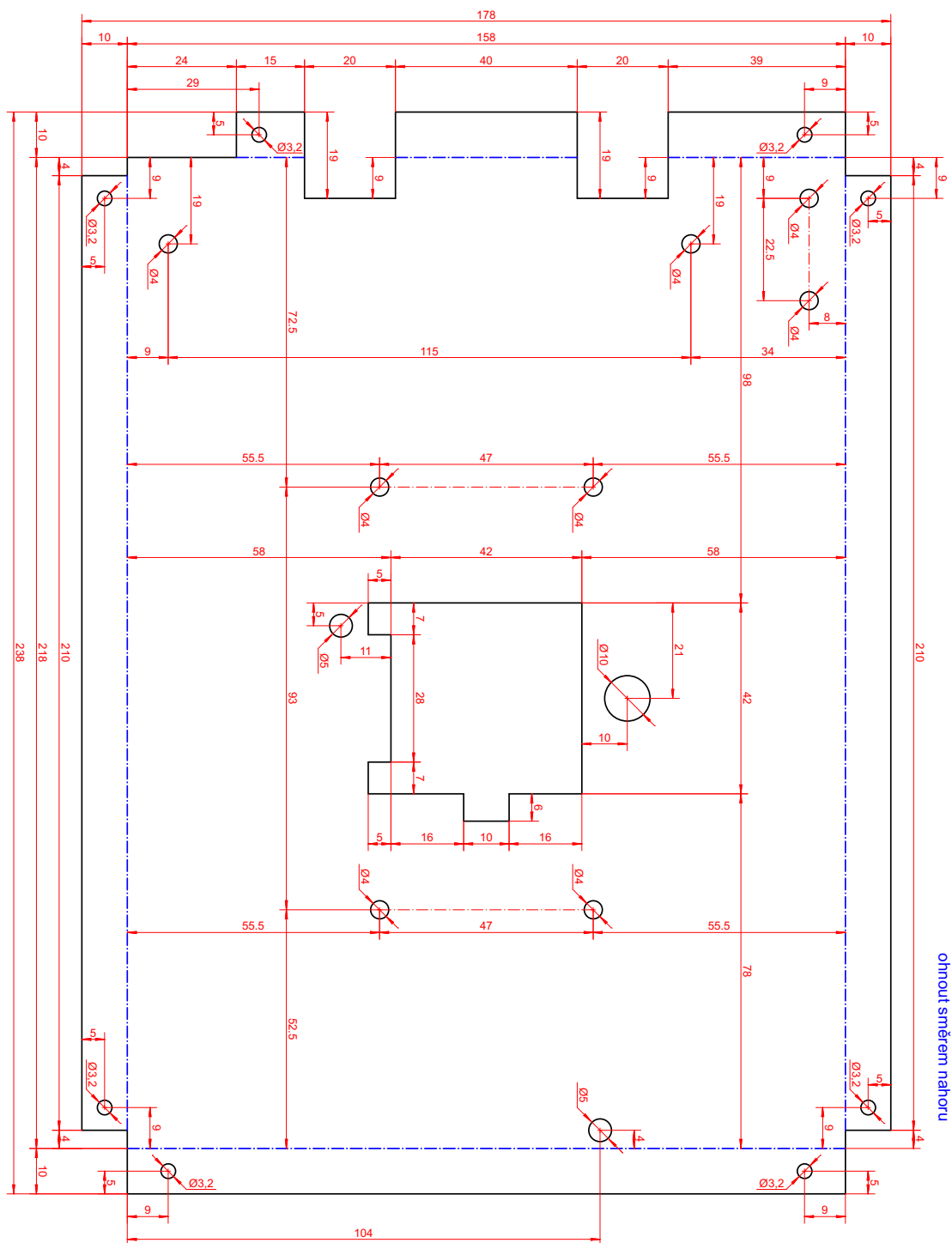
Obrázek 7: C.3 Stěna zadní



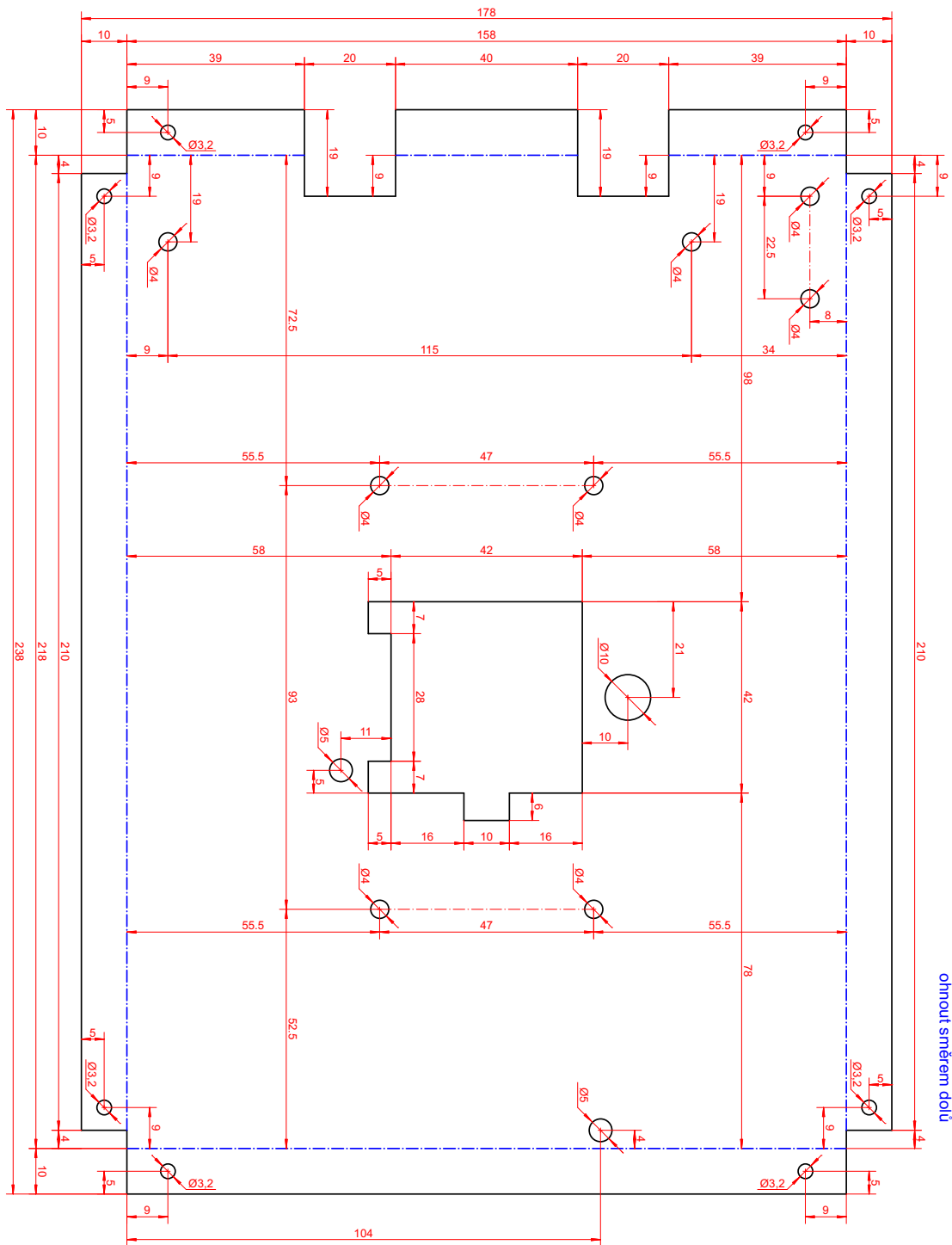
Obrázek 8: C.4 Stěna levá



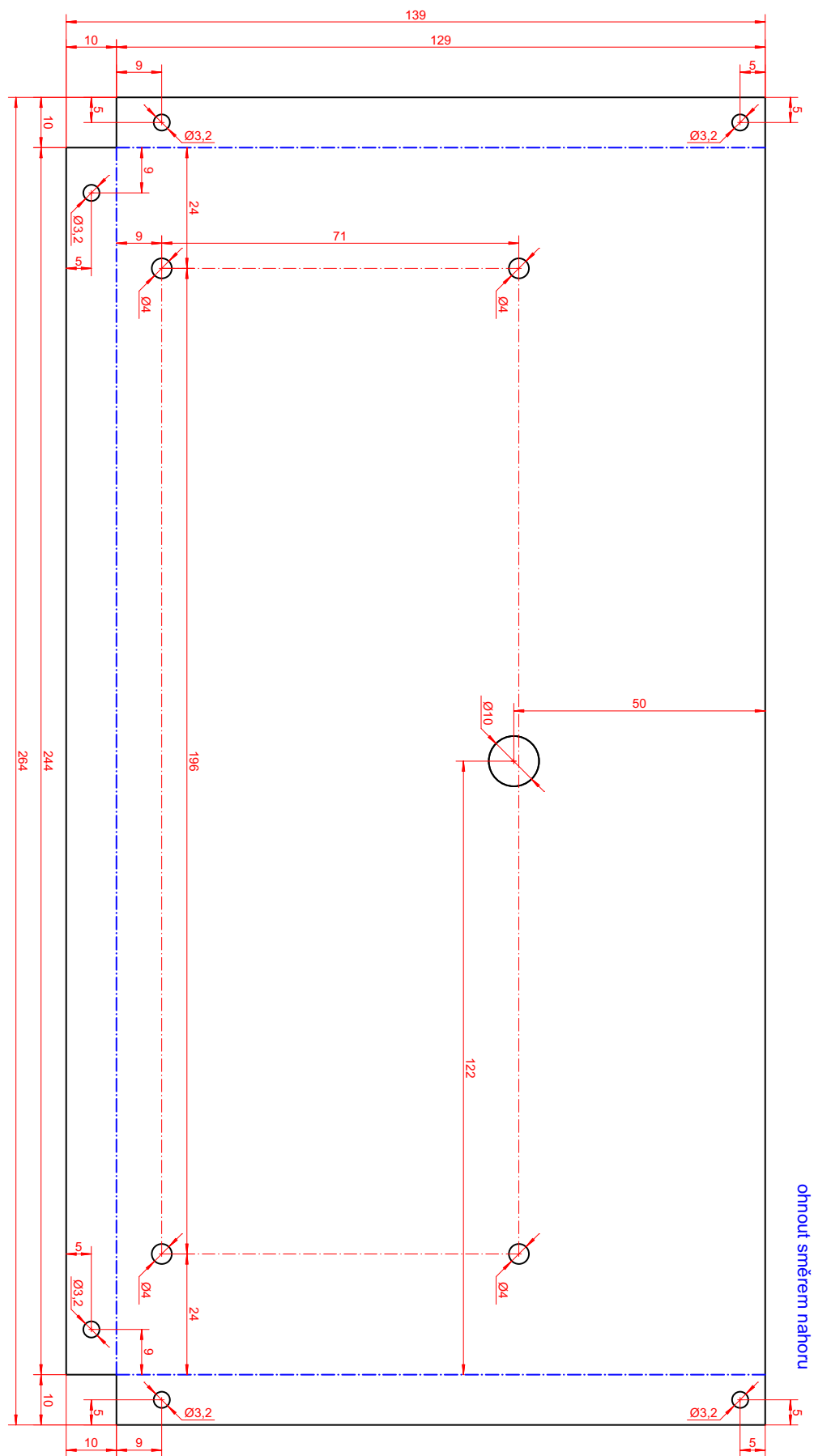
Obrázek 9: C.5 Stěna pravá



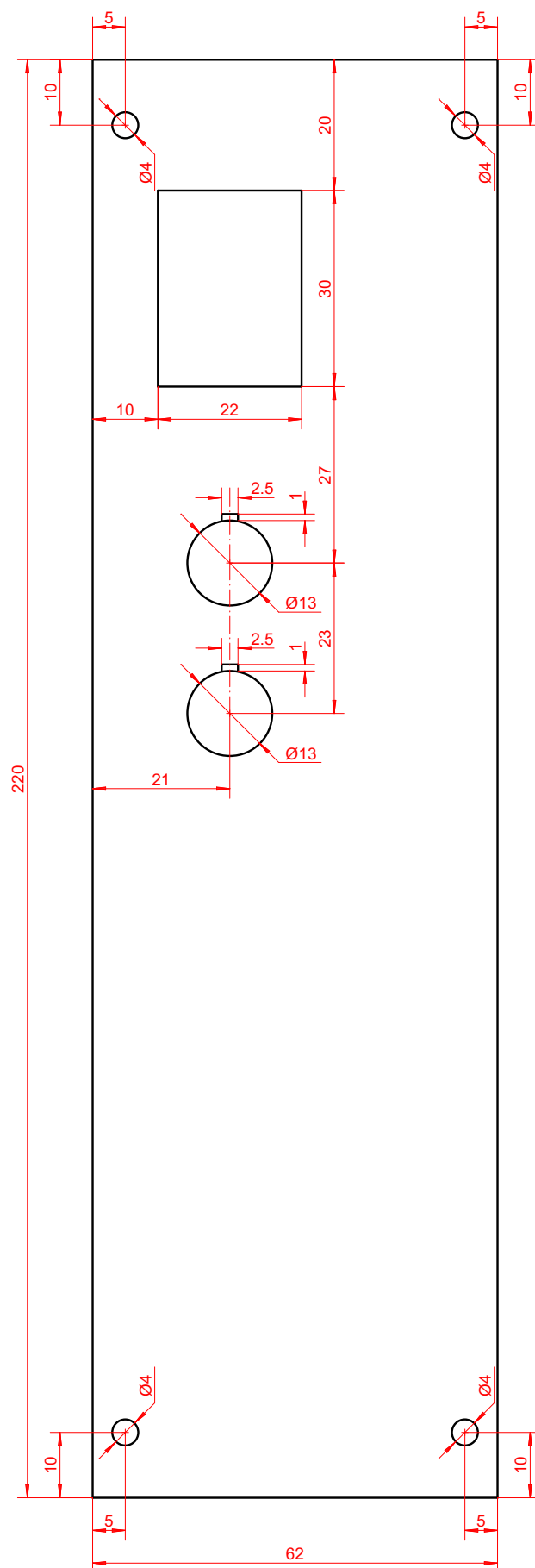
Obrázek 10: C.6 Příčka levá



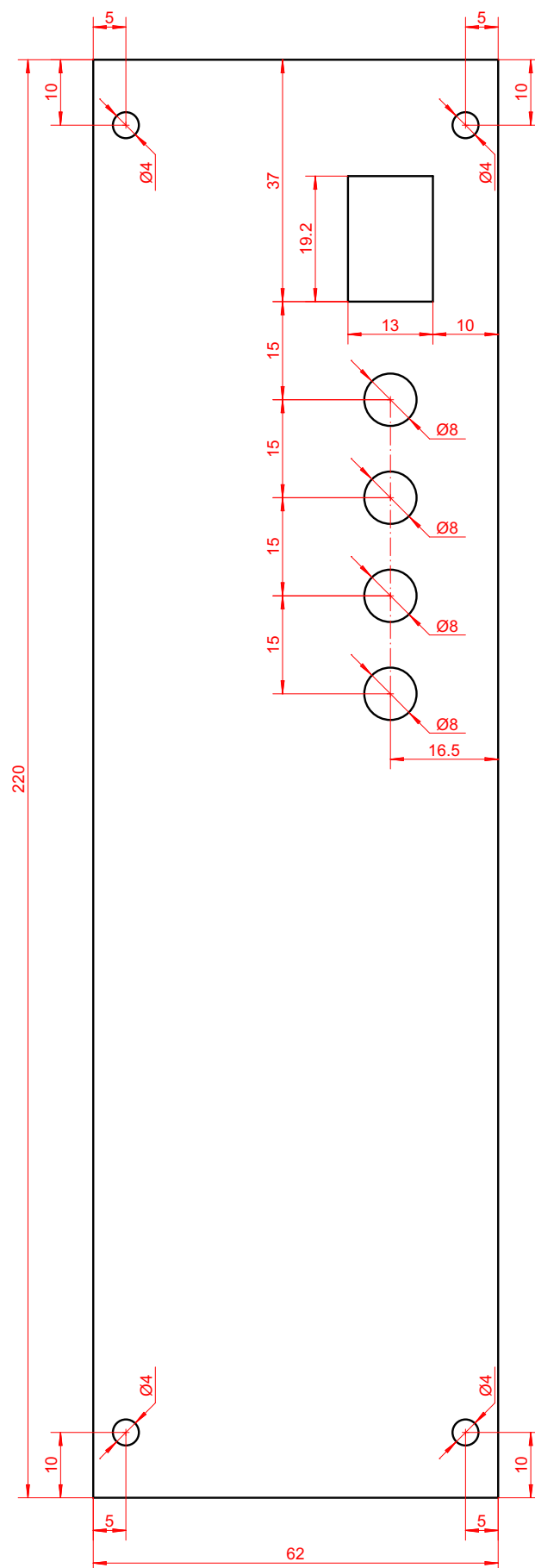
Obrázek 11: C.7 Příčka pravá



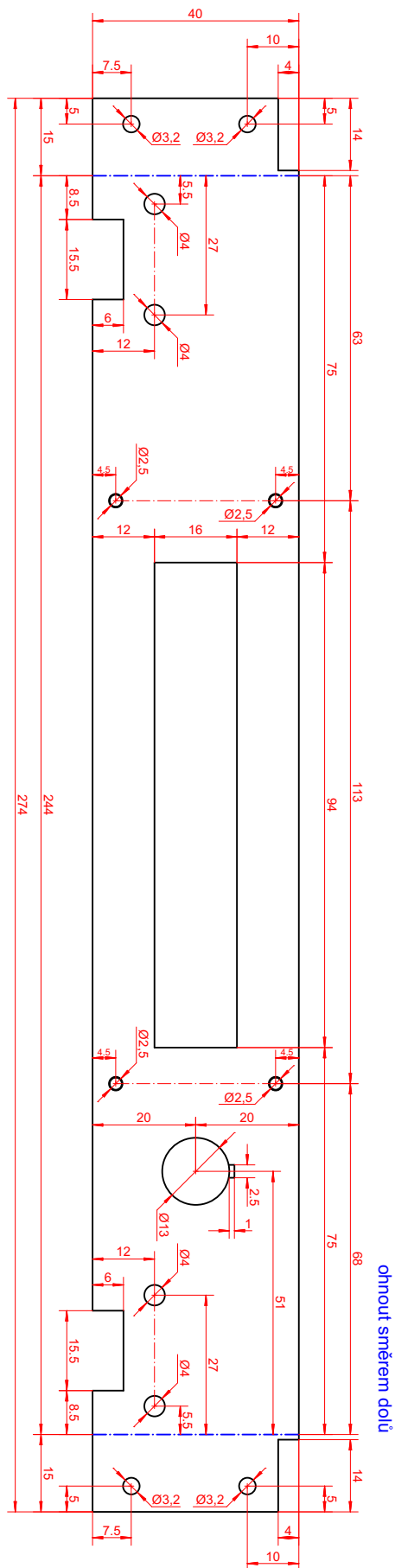
Obrázek 12: C.8 Příčka vnitřní



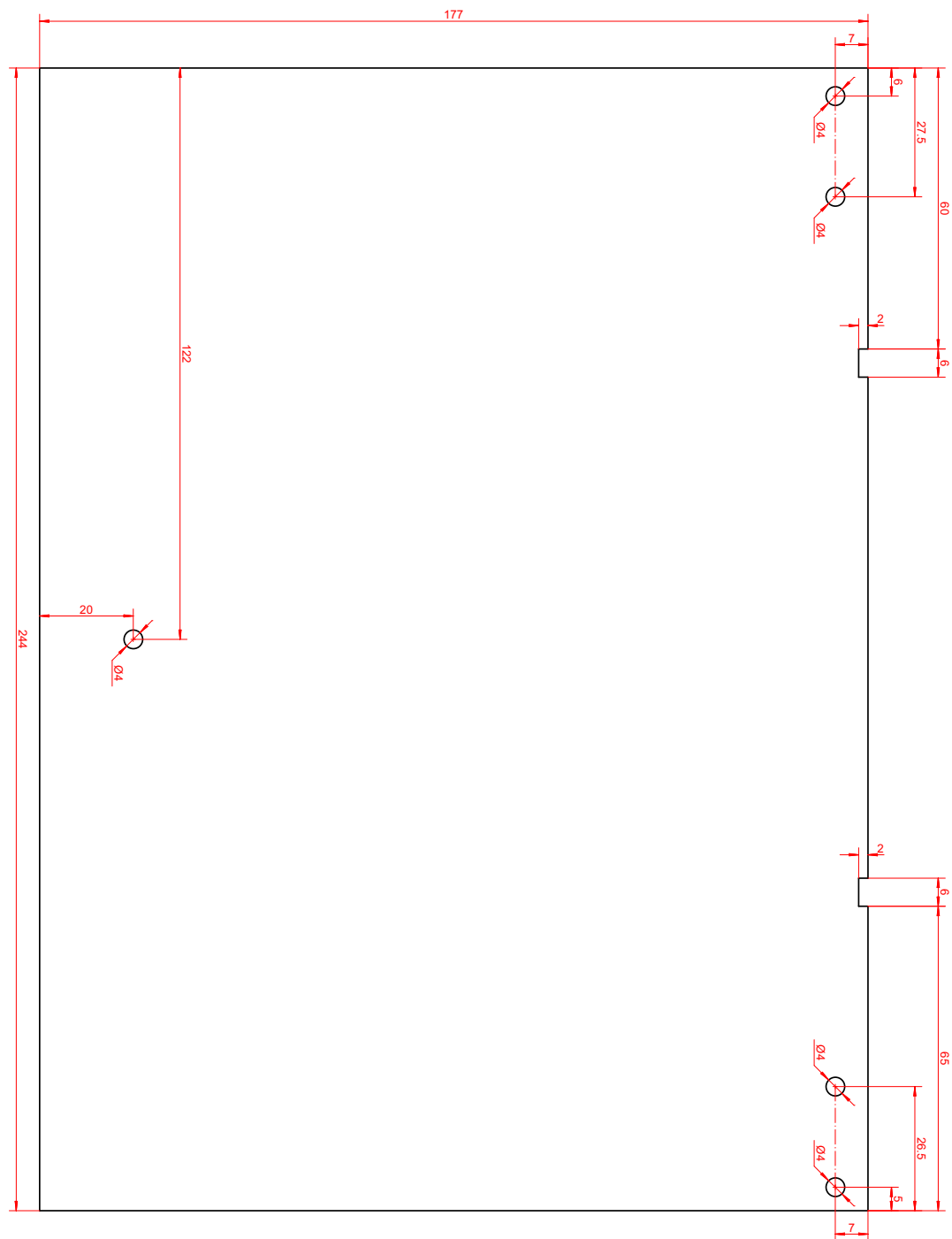
Obrázek 13: C.9 Víko levé



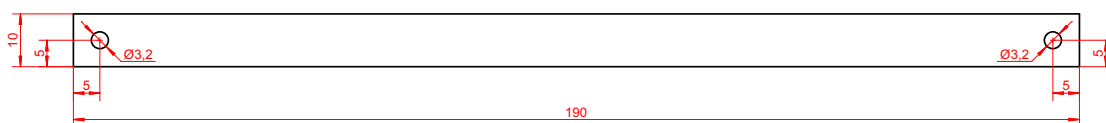
Obrázek 14: C.10 Víko pravé



Obrázek 15: C.11 Víko LCD

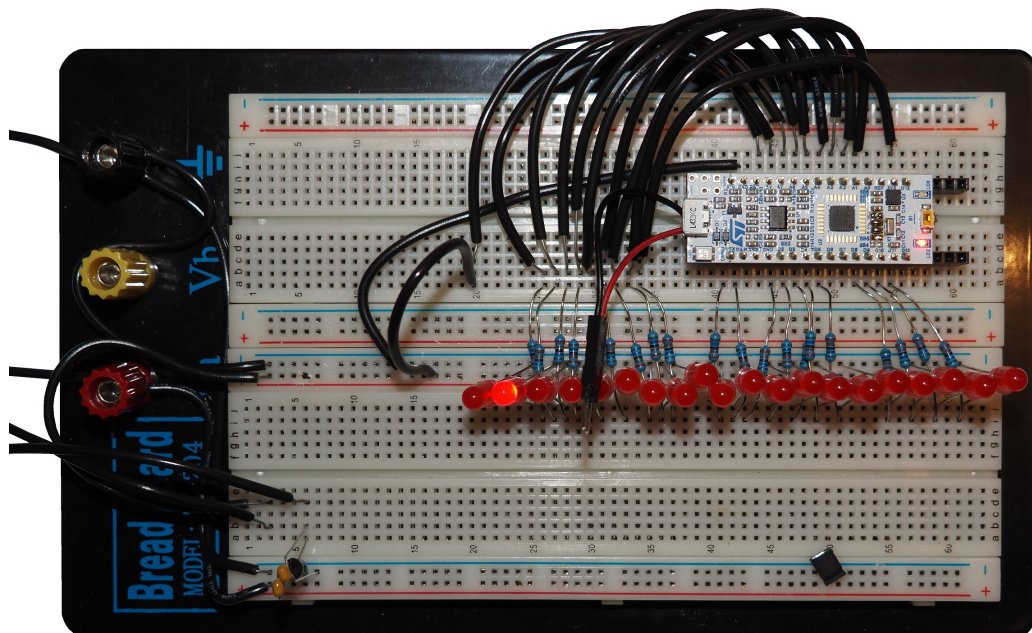


Obrázek 16: C.12 Víko zvedací

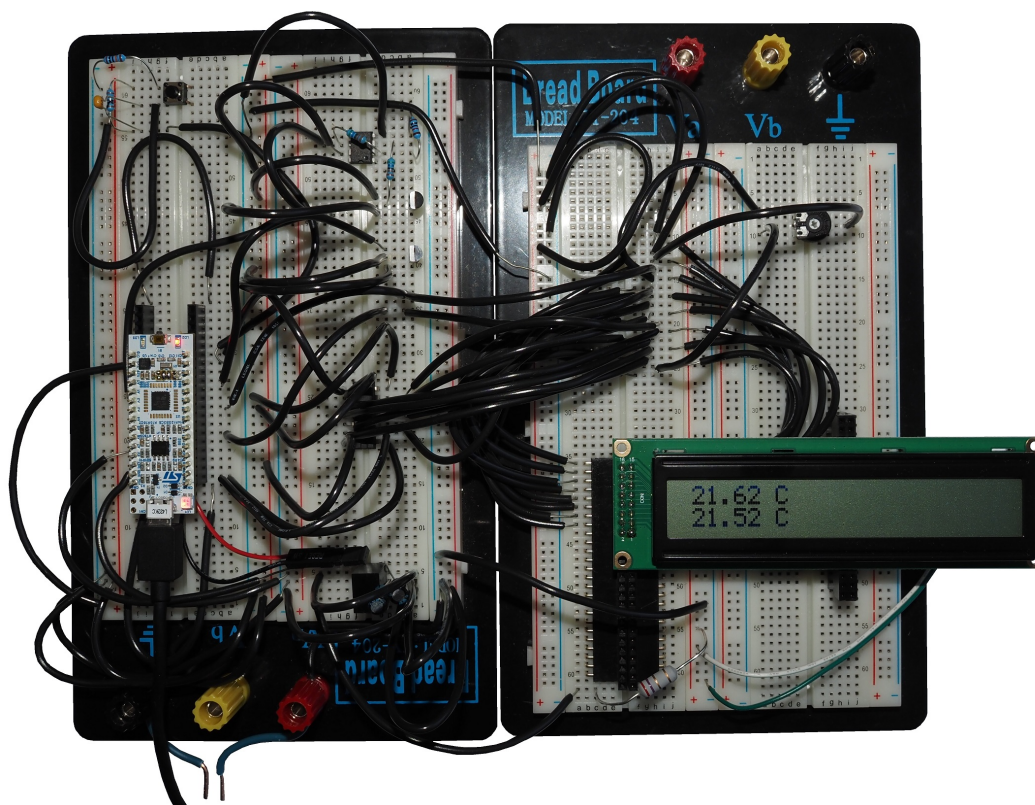


Obrázek 17: C.13 Příložka na sítku krytí prúdů k elektronice

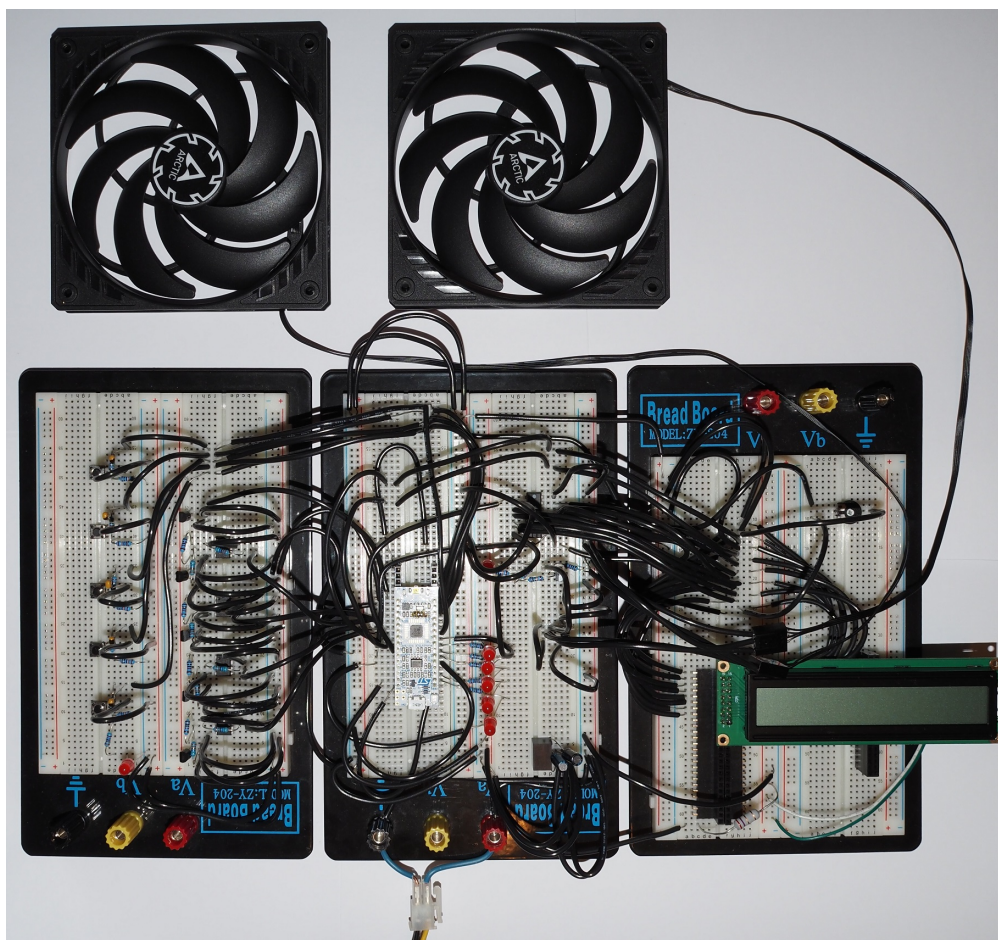
D Fotografie dokumentující výrobu teplotní komory



Obrázek 18: Ověření dostupnosti pinů Nuclea



Obrázek 19: Ověření činnosti teplotních senzorů



Obrázek 20: Zkušební zapojení na nepájivých polích



Obrázek 21: Zkušebně sestavená skříň komory - zepředu zavřená



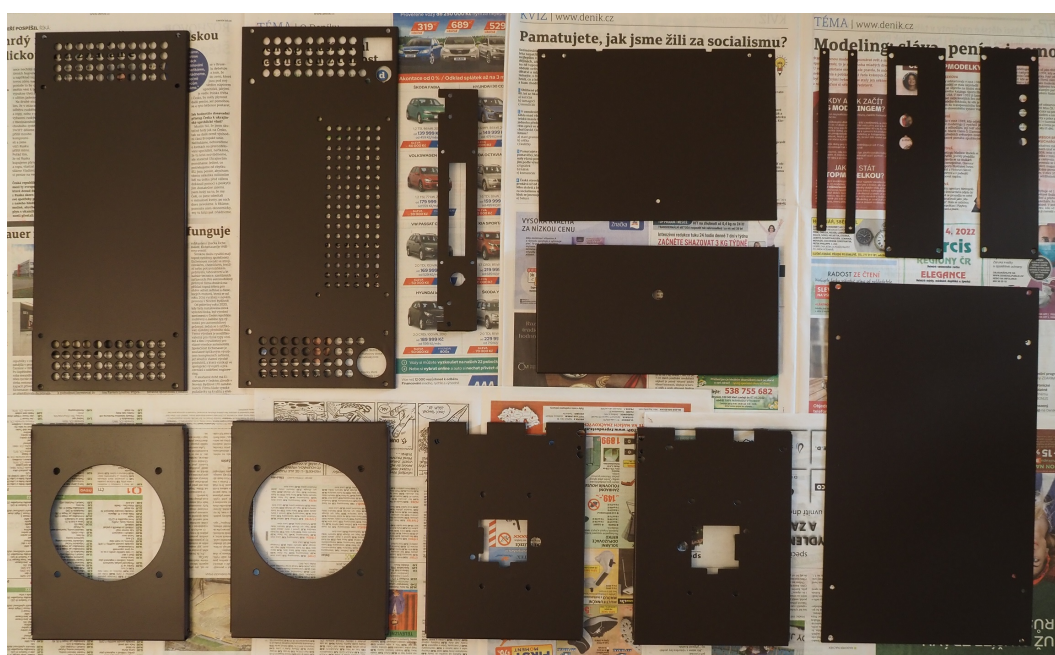
Obrázek 22: Zkušebně sestavená skříň komory - zepředu otevřená



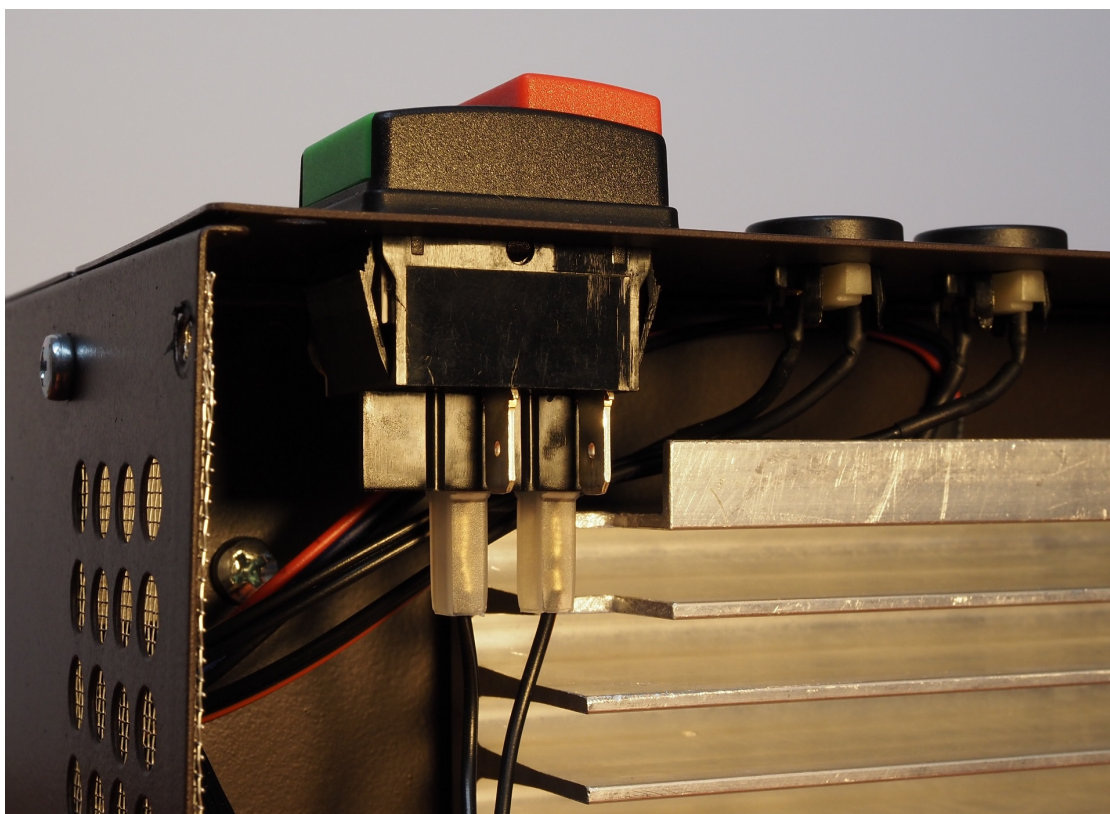
Obrázek 23: Zkušebně sestavená skříň komory - detail víka



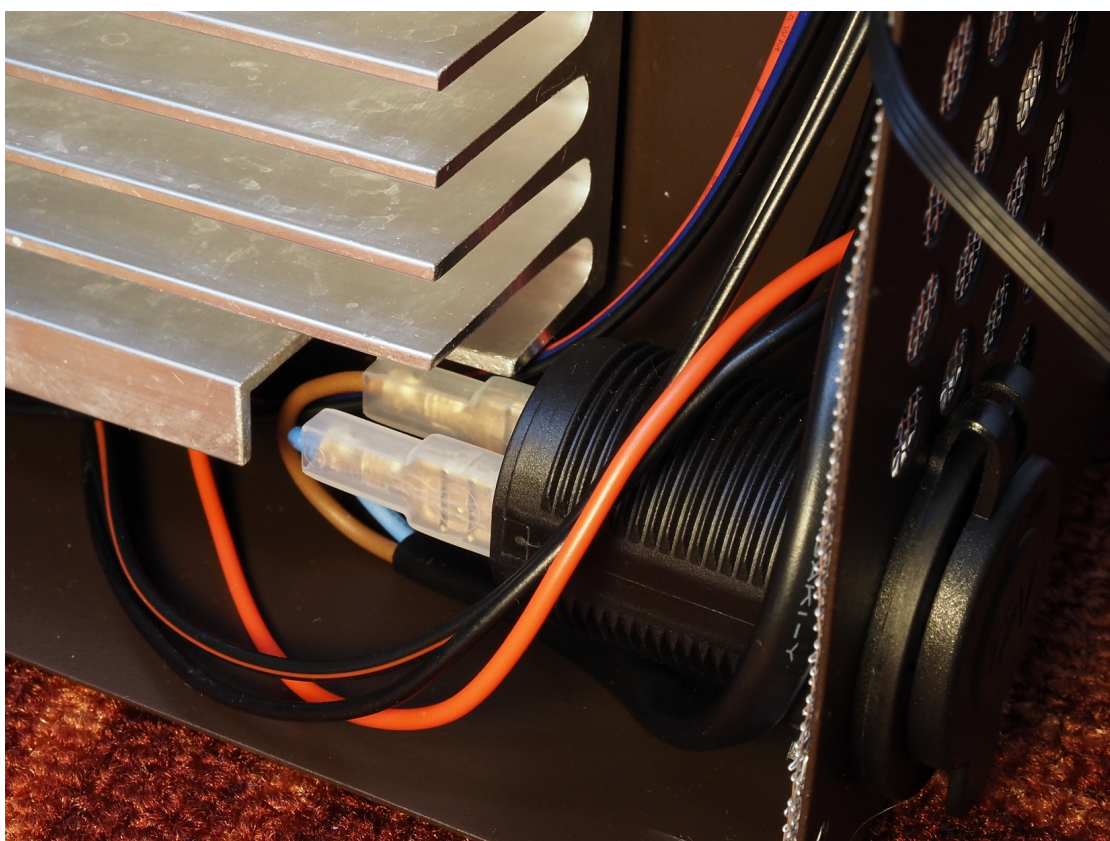
Obrázek 24: Zkušebně sestavená skříň komory – zezadu otevřená



Obrázek 25: Natřené plechy skříň komory



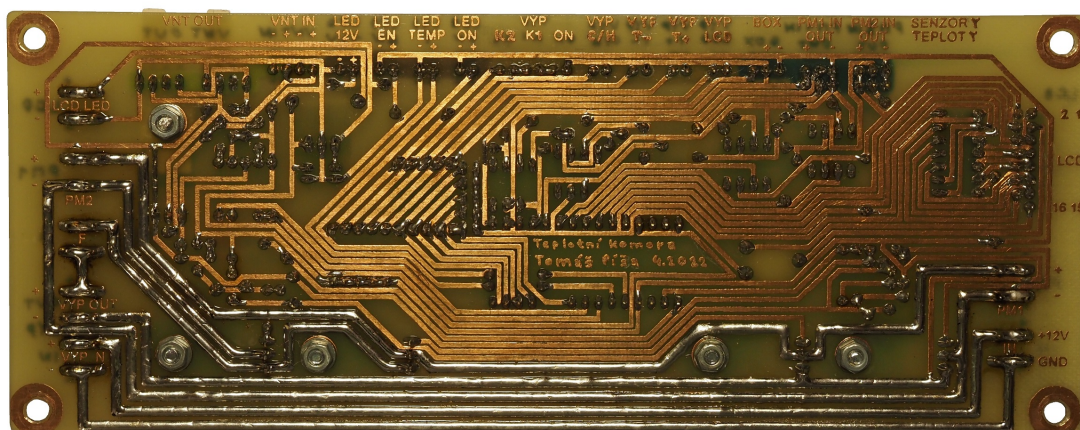
Obrázek 26: Detail výřezu v levém vnějším chladiči



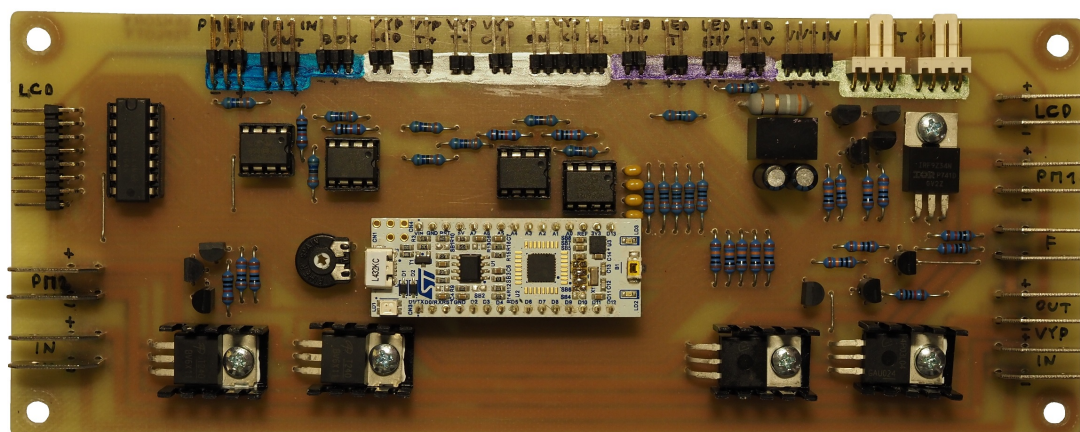
Obrázek 27: Detail výřezu v pravém vnějším chladiči



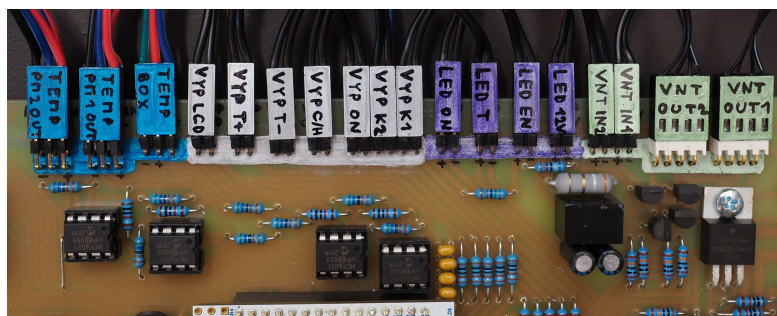
Obrázek 28: Vyhlazený měděný blok s otvory pro přichycení vnitřního chladiče



Obrázek 29: Realizovaný plošný spoj ze strany spojů



Obrázek 30: Realizovaný plošný spoj ze strany součástek



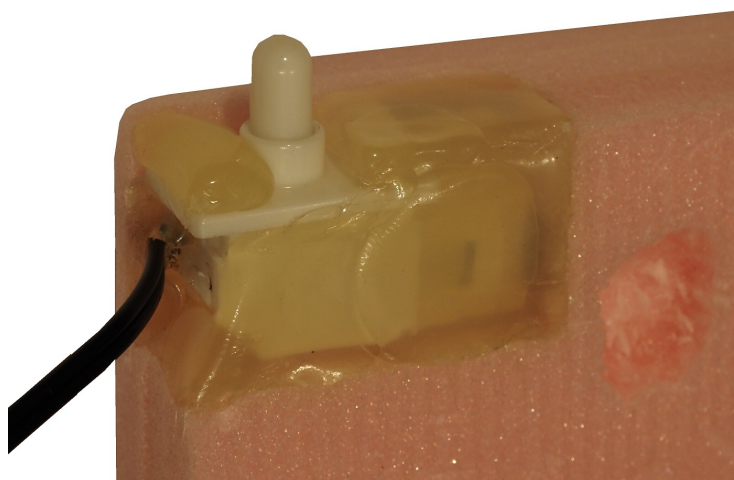
Obrázek 31: Detail barevného značení jednotlivých konektorů připojených k DPS



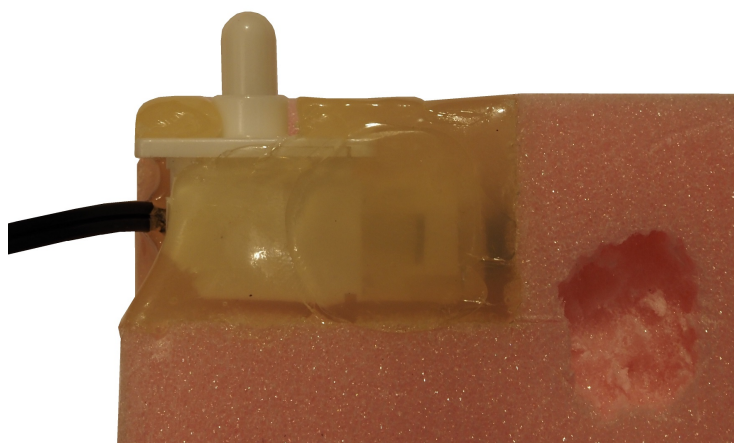
Obrázek 32: Detail původního způsobu zabudování senzoru teploty v komoře



Obrázek 33: Detail konečného umístění senzoru teploty v komoře



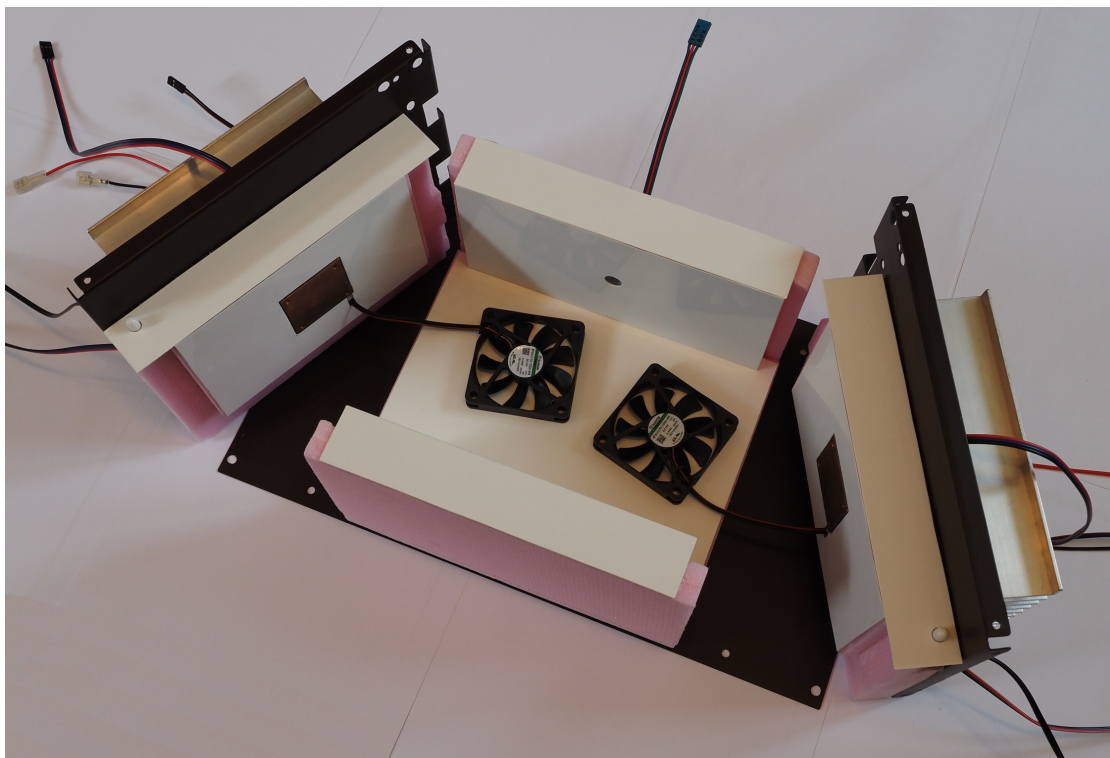
Obrázek 34: Detail zabudovaného koncového spínače



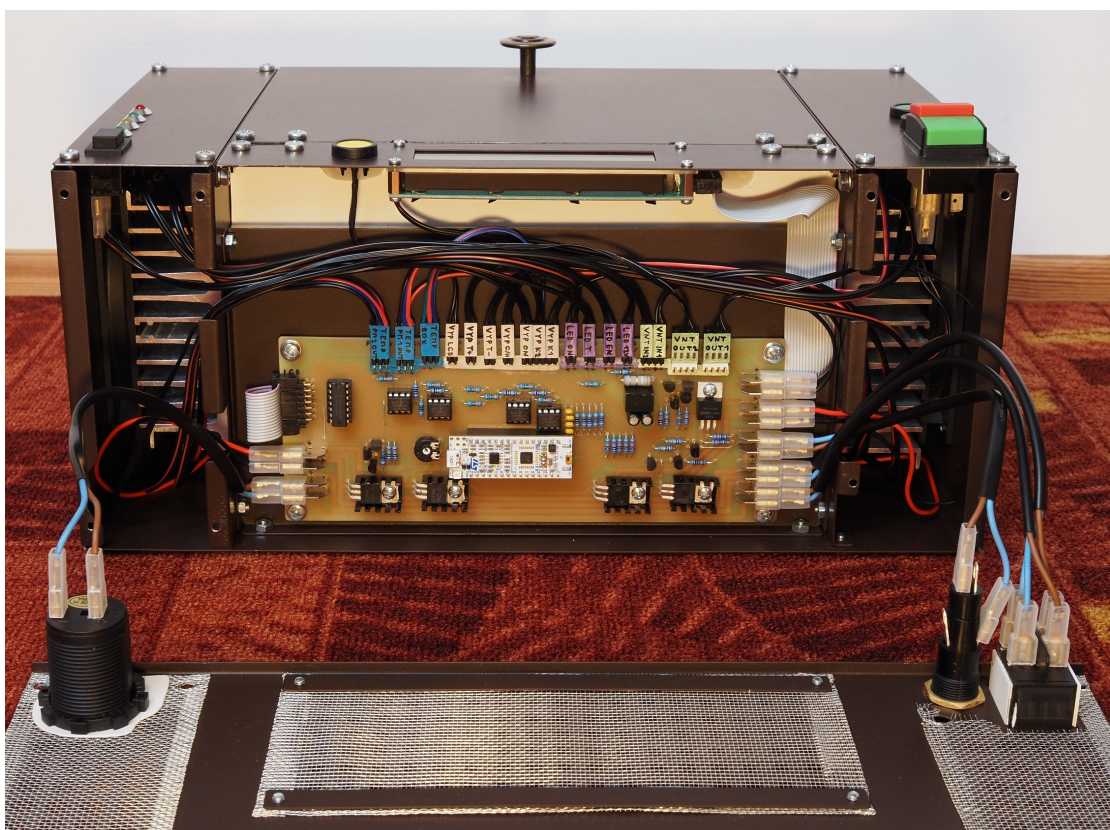
Obrázek 35: Detail zabudovaného koncového spínače - kolmý pohled



Obrázek 36: Detail zajišťovacího mechanismu indikačních LED



Obrázek 37: Izolovaná komora před složením



Obrázek 38: Připojení veškerých komponent k DPS

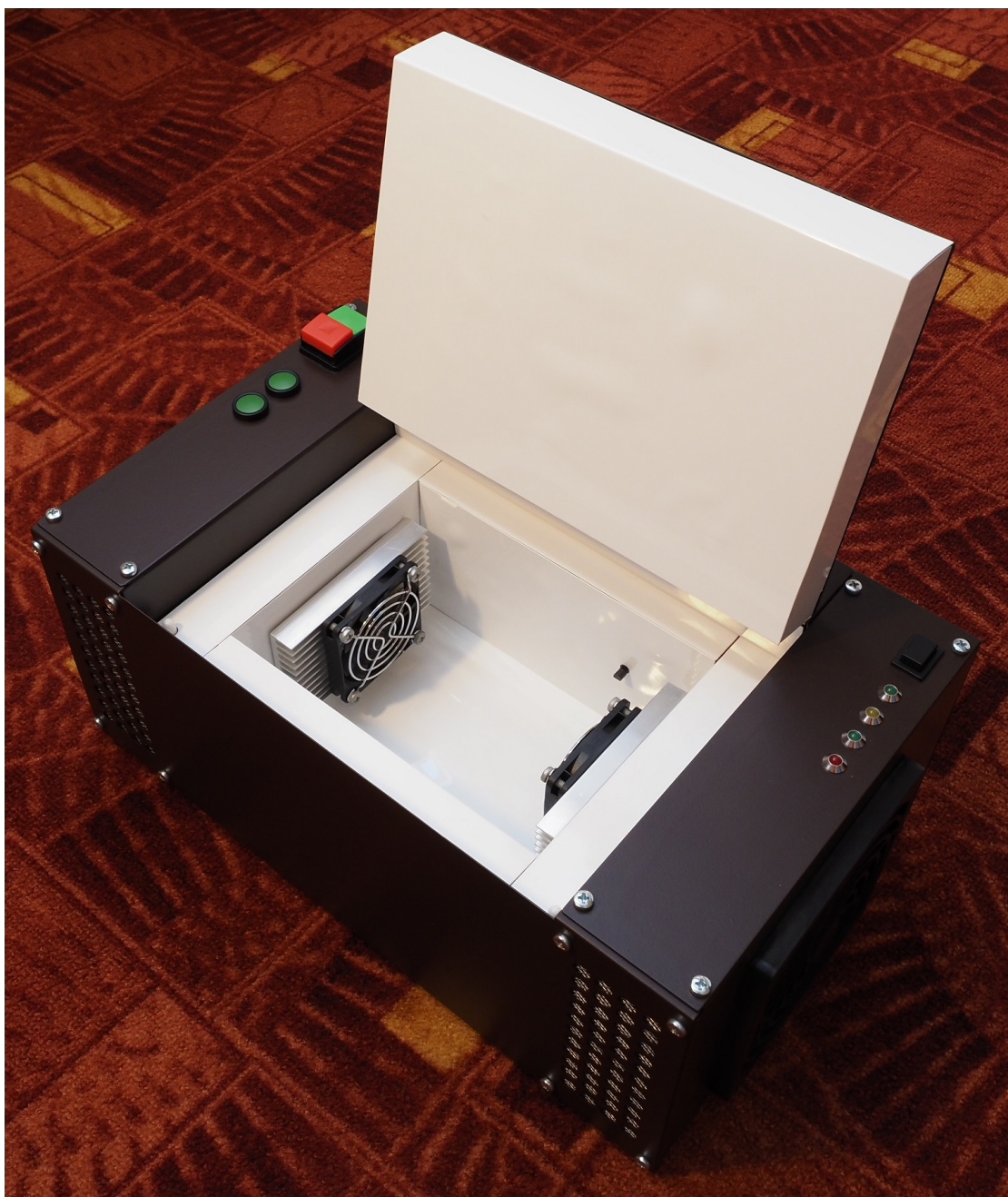
E Fotografie dokumentující realizovanou teplotní komoru



Obrázek 39: Finální podoba modelu teplotní komory - zepředu zavřená



Obrázek 40: Finální podoba modelu teplotní komory - detail víka



Obrázek 41: Finální podoba modelu teplotní komory - zepředu otevřená



Obrázek 42: Finální podoba modelu teplotní komory - zezadu



Obrázek 43: Detail izolované komory



Obrázek 44: Komora v činnosti - aktivní chlazení



Obrázek 45: Detail normálního zobrazení LCD



Obrázek 46: Detail doplňkového zobrazení LCD



Obrázek 47: Komora v činnosti - po dosažení nastavené teploty

F Elektronické přílohy

F.1 Zkompilovaný řídicí program

F.2 Tabulky změřených hodnot

F.3 Kompletní seznam použitých součástek a materiálu