

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Pájecí pec

Matyáš Buryanec

Bakalářská práce

2025

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Matyáš Buryanec**  
Osobní číslo: **I22052**  
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Pájecí pec**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh pájecí pece, pro pájení přetavením. Teoretická část práce popíše a rozebere možnosti ohřevu desky plošných spojů během pájení, například horký vzduch, IR, konvekce, pájení v parách, a to jak z pohledu pájení, tak z pohledu konstrukce a možností topných elementů. Bude provedeno porovnání s ohledem na rovnoměrnost ohřevu DPS, případně dalších vlivů na kvalitu pájení. Praktická část práce provede návrh pájecí pece na zvoleném principu. K peci bude proveden návrh konstrukce, výběr a dimenzování topných elementů, návrh elektroniky řízení teploty (pájecího cyklu s definovanými průběhy) Systém bude ověřen na reálných DPS.

---

Rozsah pracovní zprávy: **30-50**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektroniky a rádiových systémů

Datum zadání bakalářské práce: **6. ledna 2025**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

**prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**doc. Ing. Jan Pidanič, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. ledna 2025

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Práci s názvem Pájecí pec jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 16. 5. 2025

Matyáš Buryanec

## **Poděkování**

Úvodem bych rád poděkoval panu Ing. Rozsivalovi za prvotní vnuknutí myšlenky a materiálovou podporu. Dále děkuji rodině za velmi důležitou podporu po celou dobu studia. Mé díky patří také přítelkyni za výpomoc s pracemi na konstruování přístroje a také Mgr. Jandové za pomoc s korekturou průvodní práce. Za konzultace k mechanické konstrukci plechových dílů a jejich vyhotovení bych rád poděkoval firmě LH Technik s.r.o. a jmenovitě Martinovi Kubečkovi.

## **Anotace**

Tato práce se zabývá teoretickým rozbořem pájení desek plošných spojů přetavením pájecí pasty v peci. Dále je uveden rozbor měření teploty a regulace zařízení na pájení přetavením. V poslední části je takové zařízení navrženo a realizováno. Jsou popsány všechny kroky návrhu a vlastní výroby podložené teoretickými znalostmi. Výsledný produkt je úspěšně otestován na reálných deskách plošných spojů.

## **Klíčová slova**

pájecí pec, regulace teploty, pájení desek plošných spojů, pájení přetavením, snímání teploty, konstrukce pájecí pece

## **Title**

Reflow oven

## **Annotation**

This bachelor's thesis examines the theoretical aspects of soldering printed circuit boards through reflow soldering in an oven. It also analyzes temperature measurement and control systems for reflow soldering equipment. The final part of the thesis involves the design and implementation of such a device. The process includes a detailed description of all design and manufacturing steps, supported by theoretical insights. The completed device is successfully tested on real printed circuit boards.

## **Keywords**

reflow oven, temperature control, soldering of printed circuit boards, reflow soldering, temperature sensing, soldering oven design

## Obsah

<b>Seznam zkratk</b> .....	<b>11</b>
<b>Seznam obrázků</b> .....	<b>13</b>
<b>Seznam tabulek</b> .....	<b>14</b>
<b>Úvod</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Pájení přetavením</b> .....	<b>16</b>
1.1 Proces pájení přetavením.....	16
1.1.1 Nanášení pájecí pasty.....	16
1.1.2 Osazování součástek .....	17
1.1.3 Fáze sušení .....	18
1.1.4 Ohřev desky plošných spojů .....	19
1.1.5 Ochlazení desky plošných spojů .....	19
1.1.6 Oplachování, čištění a lakování.....	19
1.2 Vlastnosti a charakteristika ohřevu DPS .....	20
1.2.1 Vedení tepla.....	20
1.2.2 Proudění .....	21
1.2.3 Záření .....	21
1.2.4 Skupenské teplo .....	21
1.2.5 Komplikace spojené s pájením přetavením.....	22
1.3 Pájecí pasty .....	23
1.3.1 Olovnaté .....	23
1.3.2 Bezolvnaté .....	24
1.3.3 Tavidla .....	24
1.4 Teplotní profily .....	25
1.4.1 Teplotní profil olovnaté pájky .....	25
1.4.2 Teplotní profil bezolvnaté pájky.....	25
1.5 Ochranná atmosféra.....	26
<b>2 Regulace topných těles</b> .....	<b>27</b>
2.1 Měření teploty .....	27
2.1.1 Bimetalový pásek .....	27
2.1.2 Termočlánek.....	27
2.1.3 Odporový snímač.....	28

2.1.4	Termistor .....	29
2.2	Převod analogové hodnoty na digitální .....	29
2.2.1	Parametry převodníku .....	29
2.2.2	Vzorkování a kvantování .....	30
2.3	Typy realizace regulace .....	32
2.3.1	Dvoupolohová regulace .....	33
2.3.2	PID regulace .....	34
2.4	Řízení topných prvků .....	36
2.4.1	PWM .....	36
2.4.2	Fázové řízení .....	37
2.4.3	Změna napájení .....	38
2.4.4	Přepínání topných elementů .....	39
<b>3</b>	<b>Konstrukce pájecích pecí .....</b>	<b>40</b>
3.1	Komerčně dostupné možnosti .....	40
3.1.1	Fortex RF 100 .....	40
3.1.2	Juki RS 600 .....	40
3.2	Izolační materiál .....	41
3.2.1	Minerální vata .....	42
3.2.2	Pěnové sklo .....	42
3.2.3	Aerogel .....	43
3.2.4	Šamotové desky .....	43
3.2.5	Vzduchová mezera .....	44
3.2.6	Sendvičové materiály .....	44
3.3	Ovládací panel a ovládání .....	44
3.4	Vnější plášť .....	45
3.4.1	Požadavky .....	45
3.4.2	Materiál .....	45
3.4.3	IP krytí .....	45
3.5	Napájení .....	46
3.6	EMC .....	46
<b>4</b>	<b>Realizace HW .....</b>	<b>49</b>
4.1	Koncepce .....	49
4.2	Řídicí jednotka .....	49

4.2.1	Mikroprocesor .....	49
4.2.2	Snímání teploty.....	51
4.2.3	Lineární regulátor napětí.....	52
4.2.4	Snímání průchodu nulou .....	52
4.2.5	Zvuková indikace .....	53
4.2.6	Reálné provedení řídicí jednotky a DPS.....	53
4.3	Rozhraní člověk stroj.....	54
4.3.1	Displej .....	55
4.3.2	Ovládací prvky .....	56
4.3.3	Reálné provedení rozhraní člověk stroj a DPS.....	57
4.4	Topné těleso.....	58
4.4.1	Výběr typu a výpočet.....	58
4.4.2	Konstrukce .....	60
4.4.3	Spínání topného tělesa .....	61
4.5	Izolační materiál.....	63
4.5.1	Volba typu materiálu a velikosti.....	63
4.5.2	Výpočet ztrátového výkonu .....	63
4.5.3	Konečná podoba .....	64
4.6	Ventilátor .....	65
4.6.1	Konstrukce ventilátoru.....	65
4.6.2	Řízení ventilátoru .....	67
4.7	Vnější plášť.....	67
4.7.1	Materiál .....	67
4.7.2	Návrh.....	68
4.7.3	Výroba.....	69
4.7.4	Snímání a přidržení víka .....	70
4.8	Seznam součástí.....	71
<b>5</b>	<b>Realizace SW .....</b>	<b>75</b>
5.1	Blokové schéma .....	75
5.2	Důležité části programu.....	75
5.2.1	Části deklarací a přiřazení.....	75
5.2.2	Nastavení procesoru.....	76
5.2.3	Inicializace .....	77

5.2.4	Menu .....	79
5.2.5	Displej .....	81
5.2.6	Ovládací prvky .....	82
5.2.7	Regulace.....	82
5.2.8	Pájení.....	85
5.2.9	Sušení.....	88
5.2.10	Ventilátor.....	89
5.2.11	Hlídaní chyb .....	90
5.2.12	Snímání teploty.....	91
5.2.13	EEPROM.....	93
5.2.14	Časování.....	94
5.2.15	Sériové číslo .....	95
5.2.16	Graf pájení.....	95
5.2.17	Ostatní a pomocné funkce.....	97
5.3	Schéma menu.....	98
<b>6</b>	<b>Kompletace zařízení.....</b>	<b>100</b>
6.1	Sestavení.....	100
6.2	Měření.....	102
6.2.1	Parametry pece .....	102
6.2.2	Teploty a následování pájecího průběhu.....	102
6.2.3	Teploty při funkci sušení.....	104
6.3	Test funkce.....	105
6.4	Návod k obsluze.....	105
<b>Závěr</b>	<b>.....</b>	<b>106</b>
<b>Literatura</b>	<b>.....</b>	<b>108</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>.....</b>	<b>113</b>

## Seznam zkratek

SMD	Surface mounted device, povrchově montovaná součástka
3D	Třídímenzionální
DPS	Deska plošných spojů
UV	Ultra violet, ultra fialový
IR	Infra red, infračervený
BGA	Ball grid array
EHP	Evropský hospodářský prostor
RoHS	Restriction of hazardous materials, omezení nebezpečných látek
EU	European union, Evropská unie
EMC	Electro magnetic compatibility, elektro magnetická kompatibilita
NTC	Negative temperature coeficient, negativní tepelná závislost
PTC	Positive temperature coeficient, pozitivní tepelná závislost
AD	Analogově digitální, také A/D, A/Č, AČ
DA	Digitálně analogový, také D/A, Č/A, ČA
PID	Proporcionálně integračně derivační
PSD	Proporcionálně sumačně derivační
PI	Proporcionálně integrační
PD	Proporcionálně derivační
P	Proporcionální
PWM	Pulse width modulation, pulzně šířková modulace
DC	Direct current, stejnosměrný proud
AC	Alternate current, střídavý proud
LED	Light emitting diode, světlo vyzařující dioda
DPH	Daň z přidané hodnoty
TUV	Teplá užitková voda
HMI	Human machine inreface, rozhraní člověk stroj
UPDI	Unified program and debug interface, společné programovací a debugovací rozhraní
LCD	Liquid crystal display, displej s tekutými krystaly
HW	Hardware
RAM	Random access memory, operační paměť
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only-memory, elektricky mazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení
SPI	Seriál peripheral interface, sériové periferní rozhraní
MSB	Most significant bit, nejvýznamnější bit
SS	Slave select, výběr podřízeného zařízení
GND	Ground, zem, společný potenciál
DRDY	Data ready, připravená data
PCB	Printed, circuit board, deska plošných spojů
IO	Input/output, vstup/výstup
CNC	Computer numerical control, počítačem řízené obrábění

RC	Resistor capacitor, kondenzátor a rezistor
DC	Direct current, stejnosměrný proud
SW	Software
FCE	Funkce
ZCD	Zero crossing detector, detektor průchodu nulou

## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Pájení přetavením [3].....	16
Obrázek 2 - Šablona pro nanášení pájecí pasty [4].....	17
Obrázek 3 - Detail na osazovací automat [5] .....	18
Obrázek 4 - Indikační terčík [foto autor] .....	19
Obrázek 5 - Aplikování UV laku [8] .....	20
Obrázek 6 - Efekt náhrobních kamenů [13].....	23
Obrázek 7 - Teplotní profil pro olovnatou pájecí pastu SMD291AX10 [16].....	25
Obrázek 8 - Teplotní profil pro bezolovnatou pájecí pastu SMD291SNL10 [17].....	26
Obrázek 9 - Typická struktura měření termočlánkem [20].....	28
Obrázek 10 - Aliasing [24].....	31
Obrázek 11 - Znázorněné kvantování a vzorkování [25].....	31
Obrázek 12 - Uzavřený regulační obvod [24] .....	32
Obrázek 13 - Regulační obvod s číslicovým regulátorem [24].....	33
Obrázek 14 - Odezva regulátoru na jednotkový skok [26] .....	34
Obrázek 15 - Přenosová charakteristika dvoupolohového regulátoru [27].....	34
Obrázek 16 - Odezvy různých variant regulátorů na jednotkový skok [28].....	35
Obrázek 17 - Příklad PWM o různé střídě [30].....	37
Obrázek 18 - Fázové řízení [21].....	38
Obrázek 19 - Menší prototypová pájecí pec [31] .....	40
Obrázek 20 - Průběžná průmyslová pájecí pec [32].....	41
Obrázek 21 - Použití pěnového skla [34].....	42
Obrázek 22 - Demonstrace izolačních vlastností aerogelu [35].....	43
Obrázek 23 - Základní EMC filtry [37] .....	47
Obrázek 24 - Kompletní schéma řídicí jednotky.....	49
Obrázek 25 - Schéma zapojení snímání teploty .....	52
Obrázek 26 - Lineární regulátory .....	52
Obrázek 27 - Schéma snímání průchodu nulou.....	53
Obrázek 28 - Schéma indikačního bzučáku .....	53
Obrázek 29 - DPS řídicí jednotky horní pohled .....	54
Obrázek 30 - DPS řídicí jednotky spodní pohled.....	54
Obrázek 31 - Schéma rozhraní člověk stroj .....	55
Obrázek 32 - Foto provedení HMI .....	56
Obrázek 33 - Schéma zapojení rotačního enkodéru .....	57
Obrázek 34 - DPS rozhraní člověk stroj .....	57
Obrázek 35 - Hotový ovládací panel .....	58
Obrázek 36 - Model nosné konstrukce topného tělesa .....	60
Obrázek 37 - Topné těleso .....	61
Obrázek 38 - Schéma spínání topného tělesa.....	62
Obrázek 39 - Foto galvanického oddělení části obvodu se síťovým napětím.....	63
Obrázek 40 - Realizovaná pájecí komora .....	65
Obrázek 41 - Elektromotor s hřídelovou spojkou a snímačem otáček .....	66

Obrázek 42 - Kluzné ložisko .....	66
Obrázek 43 - Schéma spínání ventilátoru .....	66
Obrázek 44 - Schéma zapojení zpětné vazby otáček .....	67
Obrázek 45 - Vizualizace konstrukce LP .....	68
Obrázek 46 - Vizualizace konstrukce PP .....	68
Obrázek 47 - Vizualizace konstrukce LZ .....	69
Obrázek 48 - Přední pohled na hotovou pec .....	69
Obrázek 49 - Zadní pohled na hotovou pec .....	70
Obrázek 50 - Schéma zapojení elektromagnetu a magnetického kontaktu .....	71
Obrázek 51 - Elektromagnety se snímačem víka a pružinami .....	71
Obrázek 52 - Blokové schéma programu .....	75
Obrázek 53 - Blokové schéma menu .....	99
Obrázek 54 - Schéma zapojení pájecí pece .....	100
Obrázek 55 - Skládání pece .....	101
Obrázek 56 - Finalizace skládání .....	101
Obrázek 57 - Graf teplotního průběhu pro pájení Pb s PID regulací .....	103
Obrázek 58 - Graf teplotního průběhu pro pájení Pb s ON/OFF regulací .....	103
Obrázek 59 - Graf teplotního průběhu pro sušení s PID regulací .....	104
Obrázek 60 - Graf teplotního profilu pro sušení s ON/OFF regulací .....	104
Obrázek 61 - Test pájení .....	105

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Podmínky skladování součástek [1] .....	18
Tabulka 2 - Vybrané vlastnosti pájecích kapalin Galden LS a HS [12] .....	22
Tabulka 3 - Vlastnosti pěnového skla [34] .....	43
Tabulka 4 - Třídy IP [36] .....	45
Tabulka 5 - Seznam součástek řídicího obvodu .....	72
Tabulka 6 - Seznam součástek rozhraní člověk stroj .....	73
Tabulka 7 - Seznam součástek externích prvků .....	73
Tabulka 8 - Kompletní seznam funkcí menu .....	79
Tabulka 9 - Ostatní a pomocné funkce .....	97
Tabulka 10 - Parametry pájecí pece .....	102

## Úvod

Elektronické obvody se v moderní době nachází téměř všude kolem nás. Dochází k miniaturizaci a zvýšení komplexnosti obvodů, a proto také dochází k masivnímu upřednostňování SMD součástek. SMD je označení pro součástky určené pro povrchovou montáž, a tudíž technika jejich pájení k desce plošných spojů je odlišná od typů pro montáž skrz desku. Jedním z vysoce efektivních způsobů, jak povrchově montované součástky připájet, je pájení přetavením v peci. V posledních desetiletích se tato metoda masivně rozšířila do výrobních společností i do vývojových a prototypových laboratoří. Stále větší oblibě se jí také dostává i mezi hobby konstruktéry, a to zejména díky rozšíření levné čínské výroby desek plošných spojů.

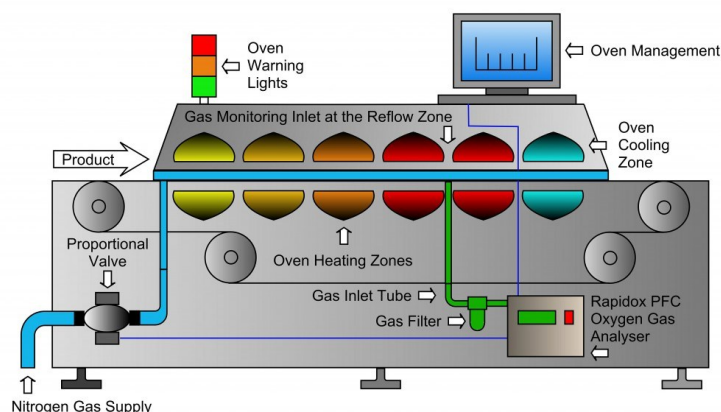
Tato práce se zabývá teoretickou přípravou a praktickou konstrukcí pece pro pájení přetavením. Pro návrh takového stroje je zapotřebí seznámit se s typy ohřevu desek. Pro vybraný typ je nutné navrhnout jeho řízení a vybrat správné napájení a spínací prvek. Aby byl dodržen teplotní profil, což je doporučená změna teploty v čase pro správné přetavení pájecí pasty, musí se teplota přesně a rychle snímat. K tomu je důležité seznámit se s různými typy snímačů teploty a s převodem analogové hodnoty na digitální. Pro udržování žádané teploty přichází na řadu volba vhodného regulátoru. Nakonec se musí zvolit velikost celkové konstrukce, vhodný izolační materiál o dostatečné tloušťce a může se přistoupit s celkové kompletací. Celá logika systému je závislá na mikroprocesoru a v něm nahaném programu. Nemůže chybět ani ovládací panel s displejem, kde si může obsluha vybrat nebo zadat teplotní profil a nastavit určité parametry procesu a regulátoru. Při poruše je vhodné mít k dispozici diagnostické funkce, které pomohou otestovat a odhalit chybně fungující dílčí části systému.

Na konci by měl tedy z práce vzejít stroj schopný kvalitně a efektivně pájet metodou přetavení pájecí pasty v peci.

# 1 Pájení přetavením

## 1.1 Proces pájení přetavením

Princip pájení přetavením spočívá v roztavení pájecí pasty nanesené na pájecí plošky desky plošných spojů. Metoda je vhodná pro pájení součástek s povrchovou montáží neboli SMD. Moderní součástky v provedení pro povrchovou montáž jsou vyráběny tak, aby vydržely vystavení teplotám tavení pájecí pasty. Na rozdíl od ručního pájení pomocí pájecího hrotu nedochází v součástkách k teplotním gradientům a tepelnému namáhání vlivem teplotní roztažnosti materiálů s různou teplotou. Při procesu pájení přetavením je na desku plošných spojů nejprve nanesena pájecí pasta. Následně jsou do nanesené pasty vsazeny součástky s povrchovou montáží. Takto připravená deska je vystavena přesně definovanému zahřátí podle teplotního profilu a po skončení procesu je deska plošných spojů podle potřeby očištěna od zbytků tavidla. Jako volitelné fáze procesu lze uvést sušení součástek, řízené chlazení a lakování. Grafické znázornění pájení přetavením v sériové výrobě je na obrázku 1. [1; 2]

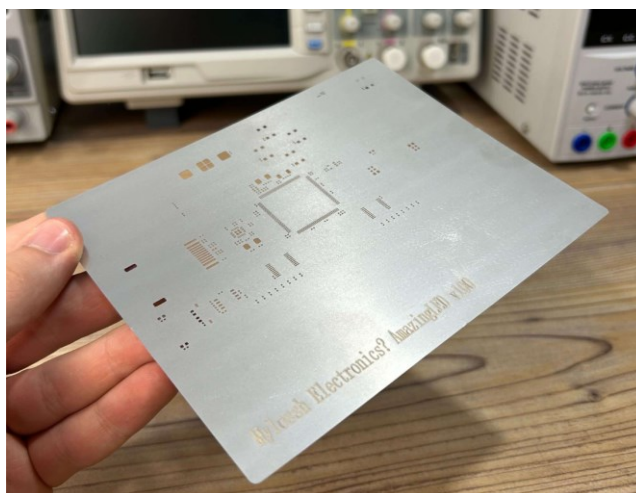


Obrázek 1 - Pájení přetavením [3]

### 1.1.1 Nanášení pájecí pasty

Nanášení pasty, která se následně v peci přetaví a zapájí součástky k desce plošných spojů, lze rozdělit na dvě skupiny. První skupinou je strojové nanášení a druhou skupinou pak ruční nanášení. Strojové nanášení pájecí pasty se nejčastěji realizuje aplikátorem, což je v podstatě hlava aplikující přesné množství pájecí pasty pohybující se ve dvou osách nad připravenou deskou plošných spojů. Takový stroj může pracovat nad dopravníkovým pásem a lze ho jednoduše začlenit do sériové výroby. Z manuálních metod nanášení pájecí pasty je nejjednodušší ruční aplikování pomocí injekční stříkačky. Taková metoda je však velmi nepřesná a množství aplikované pasty není konzistentní. Lepších parametrů lze docílit použitím šablony z plastového nebo kovového materiálu, která má v místě pájecích plošek vyřezané otvory. Tyto otvory jsou nejčastěji vyřezány pomocí laseru. Experimentovat se dá i s 3D tiskem šablony na 3D tiskárně. Přes šablonu, v anglickém jazyce nazývanou stencil, se stěrkou rozetře pájecí pasta a ta, po zvednutí šablony, zůstane v přesných množstvích

na pájecích ploškách. Příklad podoby šablony je na obrázku 2. S pomocí této metody lze docílit velmi kvalitních výsledků i v hobby podmínkách. [4]

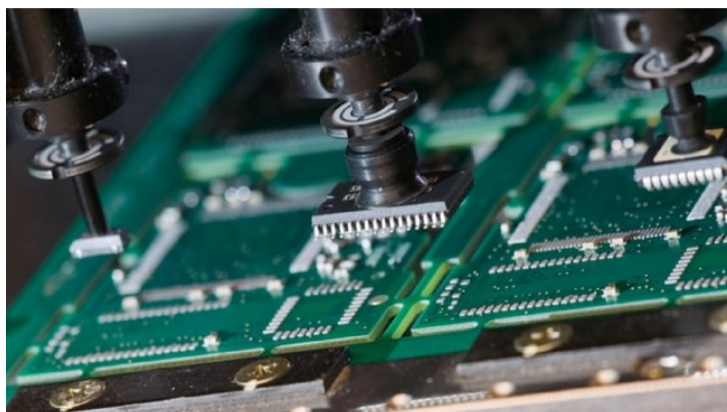


Obrázek 2 - Šablona pro nanášení pájecí pasty [4]

### 1.1.2 Osazování součástek

Přímočarým řešením osazování součástek na svá místa na desce plošných spojů se nabízí manuální usazování pomocí pinzety. Tato metoda je však náchylná na chyby lidského faktoru, kdy obsluha může osadit součástku na jiné místo, otočit ji, či ji pouze nepřesně položit na pájecí plošky. Pro odstranění některých chyb je možné využít ovládané osazovací stroje. Tyto stroje se pohybují nad DPS ve dvou osách, disponují uchopovacím mechanismem a možností rotace. Operátor navede osazovací poloautomat na místo, kde má být součástka položena pomocí ovládacího panelu. Stroj následně provede položení bez negativních vlivů, jako je třesoucí se ruka či posunutí součástky při pouštění. Stále však musí obsluha znát osazovací plán a není vyloučena lidská chyba.

Výše zmíněné metody se hodí pro prototypovou a hobby výrobu na rozdíl od plně automatického osazovacího automatu, který je vhodný na sériovou automatizovanou výrobu. Takový automat má zásobníky všech součástek, které usazuje a řídí se programem. Umisťování je tedy přesné, rychlé a bezchybné. Osazovací automat, jehož detail uchopovací hlavy je na obrázku 3, lze umístit i nad dopravníkový pás. Jeho naprogramování a umisťování součástek do zásobníku je však náročné a zdlouhavé, a tak je opravdu vhodný zejména pro sériovou výrobu. V té, po jednom naprogramování, usazuje součástky na tisíce desek bez nutnosti zásahu obsluhy. [5]



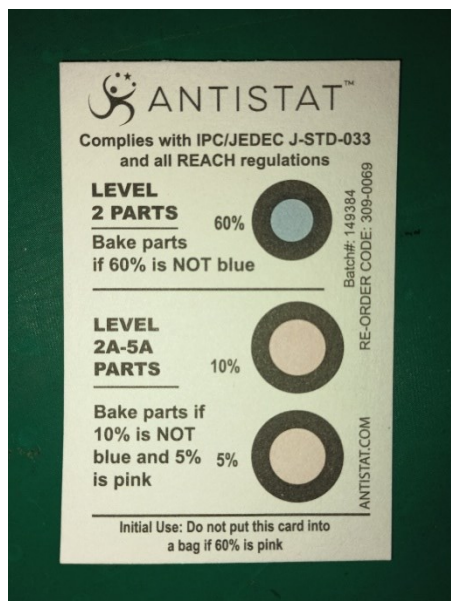
Obrázek 3 - Detail na osazovací automat [5]

### 1.1.3 Fáze sušení

Tuto fázi procesu je při dodržení určitých okolností možné vynechat. Součástky se přepravují ve speciálních antistatických pytlíčcích, ve kterých je zároveň umístěn indikátor vlhkosti, jehož podoba je na obrázku 4. Součástky jsou výrobcem přiřazeny do kategorií 1 až 6, jak je uvedeno v tabulce 1. Pokud indikátor zaznamená vlhkost nad určitou mez danou kategorií, je nutné součástky před samotným pájením nejprve vysušit. Pokud by vlhké součástky nebyly vysušeny a rovnou by se přistoupilo k procesu pájení, mohlo by dojít vlivem rychlého odpařování vlhkosti k poškození. Sušení se může provádět taktéž v pájecí peci. Teplota se nastaví na hodnotu doporučenou výrobcem pro sušení a čeká se určitý čas, než se přistoupí k samotnému pájení. [1]

Tabulka 1 - Podmínky skladování součástek [1]

Třída	Čas	Podmínky
1	Neomezeno	$\leq 30\text{ °C}/85\% \text{ RH}$
2	1 rok	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
2a	4 týdny	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
3	168 hodin	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
4	72 hodin	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
5	48 hodin	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
5a	24 hodin	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$
6	Před použitím vysušit v peci	$\leq 30\text{ °C}/60\% \text{ RH}$



Obrázek 4 - Indikační terčík [foto autor]

#### 1.1.4 Ohřev desky plošných spojů

Ohřev je klíčový proces celého postupu pájení. Vzhledem k použití pájecí pasty je zapotřebí co nejpřesněji následovat požadovaný teplotní profil. V opačném případě se může stát, že tavidlo v pastě se znehodnotí dříve, než dojde k roztavení pájky, nebo že k roztavení vůbec nedojde. K ohřevu jsou využívána topná tělesa a k přenosu tepla může být využívána tepelná kondukce, záření nebo také proudění. Ve speciálních případech je využíváno i skupenské teplo, nebo laser. [1; 2; 6]

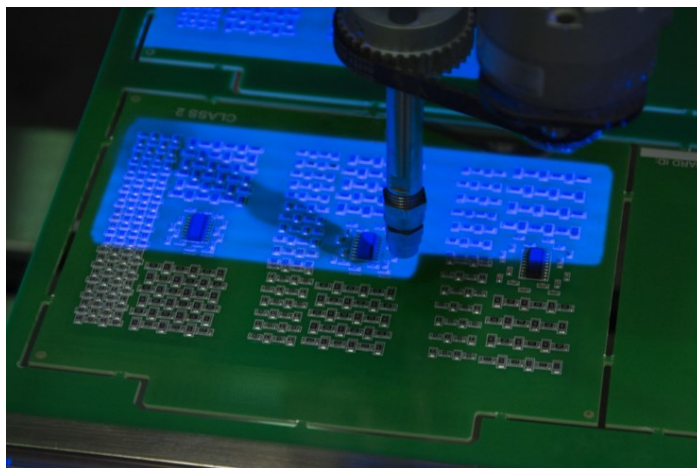
#### 1.1.5 Ochlazení desky plošných spojů

Pro další manipulaci se zapájenou deskou je vhodné, aby tato deska byla ochlazená na přijatelnou úroveň. Ve většině případů postačuje volné chlazení, kdy se deska nechá ochladit přirozeně předáním tepla do okolí. Někdy je výhodné použít řízené chlazení, kdy je snaha udržet se na nejstrmějším povoleném poklesu za jednotku času. Tento parametr je nejčastěji uveden společně s teplotním profilem a jeho dodržováním lze docílit co nejrychlejšího ochlazení bez nebezpečí poškození součástek a pájených spojů. [7]

#### 1.1.6 Oplachování, čištění a lakování

Po procesu pájení přetavením zbývají na DPS zbytky tavidla a mohou se zde objevovat i kuličky pájky. Osazené desky je proto často nutné očistit, a to nejlépe prostředkem, který nenaruší nepájivou masku ani pouzdra součástek. Aplikace laků je možná klasickými metodami jako je nanášení štětcem, či nástřikem. Celou desku plošných spojů je také možné ponořit do laku, což zaručí dokonalé uzavření a ochranu před vnějšími vlivy. Je ovšem třeba klást důraz na utěsnění nebo jiné ochránění konektorů a dalších součástek, které by vlivem laku přestaly plnit svou funkci. Typickým příkladem jsou tlačítka a podobné ovládací prvky. Modernější metoda nanášení laku využívá selektivní nanášení laku na konkrétní místa s využitím strojů. Lze tak šetřit materiál, protože není třeba pokrývat celou desku, ale jen kritická místa. Odpadá tak i nebezpečí poškození součástek, jako jsou tlačítka a konektory.

Bezbarvé laky v sobě obvykle mají látky světélkující pod UV zářením, a tak může obsluha snadno odhalit místa s nedostatečným pokrytím. Často jsou laky samotným UV zářením přímo vytvrzovány a lze tedy provádět kontrolu laku během vytvrzování, což urychluje proces a šetří výrobní náklady. K vidění je proces na obrázku 5. Laky vytvrzované UV zářením mají dobu vytvrzování pouze několik sekund a je možné pomocí nich docílit i dodatečné ochrany elektronického zařízení před UV světlem. [8]



Obrázek 5 - Aplikování UV laku [8]

## 1.2 Vlastnosti a charakteristika ohřevu DPS

V následujících podkapitolách budou rozebrány různé způsoby ohřevu desky plošných spojů v pájecí peci. Každý způsob má své výhody a nevýhody a také různé požadavky na napájení a konstrukci. Na základě těchto teoretických poznatků bude později vybrán způsob ohřevu pro vlastní konstrukci. Ten následně předurčí typ napájení a způsob spínání.

### 1.2.1 Vedení tepla

Při vedení tepla dochází k přímému styku dvou těles o odlišné teplotě, a díky tomu se mezi nimi přenáší teplo a dochází k vyrovnání vnitřní energie těles. Teplo se šíří pevnými materiály díky srážkám kmitajících atomů. Kolik energie se takto přeneso za určitý čas nám říká materiálový parametr zvaný součinitel tepelné vodivosti. Používané materiály mají hodnotu tohoto parametru v řádech stovek a jsou tedy dobrými vodiči tepla. Deska je položena na nejčastěji kovovém materiálu, který je pomocí odporového topného tělesa ohříván a regulován na požadovanou teplotu. Pokud je materiál opravdu dobrým vodičem tepla, tak nedochází k tvorbě teplotně odlišných částí od zbytku materiálu. Rovnoměrnost ohřevu tak může být velmi dobrá. Položená deska se svojí teplotou téměř neliší od teploty podkladu a při následování teplotního profilu dojde k zapájení součástek.

Tato metoda má výhody v kompaktnějším provedení a přístupu k součástkám v průběhu pájení. Mezi nevýhody patří obtížnější pájení rozměrově velkých SMD součástek vlivem chladnutí na jejich povrchu. Velké součástky totiž přenesou značnou část dodané vnitřní energie do okolí a jejich pájecí plochy nemusejí dosáhnout požadované teploty. Dále je u této metody z principu nemožná aplikace ochranné atmosféry a proces chladnutí trvá

významně delší dobu. Zařízení pracující na principu vedení tepla se nejčastěji využívá jako předehřev pro ruční pájení a opravy a je velmi oblíbené v hobby podmínkách kvůli své dostupnosti a nízké ceně. [9; 10]

### 1.2.2 Proudění

Při ohřevu prouděním se využívá toho, že deska plošných spojů vložená do pájecí pece si vyměňuje s okolím, tedy s vnitřním prostředím pece, teplo. Pokud tedy zajistíme, aby teplota uvnitř pece byla vyšší než teplota desky plošných spojů, dojde postupně ke zvýšení teploty desky. Ohřátí vnitřního prostředí se provádí na stejném principu. Vzduch, který proudí kolem odporového topného tělesa, vyrovnává svoji vnitřní energii s vnitřní energií topného tělesa a při neustálém dodávání energie do systému nakonec dojde ke zvýšení teploty uvnitř pece. Využívá se fyzikálního jevu, kdy má teplý vzduch menší hustotu než vzduch chladný, a proto stoupá vzhůru. Deska plošných spojů se proto umísťuje do horní části pece. Tento proces se dá podpořit a urychlit přidáním ventilátorů, které vzduch více promíchávají a rozhánějí a netvoří se tak lokální rozdíly mezi teplotou.

Metoda ohřevu prouděním je hojně používaná v komerčně dostupných pájecích pecích. Lze ji nalézt jak u malých levných pecí, tak i u průmyslových průběžných pecí určených pro sériovou výrobu. Rovnoměrnost ohřevu je při použití ventilátorů dostatečná a jako topné těleso lze využít odporové materiály nejrůznějších průřezů, konstrukcí a tvarů. [1; 10; 11]

### 1.2.3 Záření

Přenos tepla zářením nevyžaduje žádné přenosové médium. Jedná se vlastně o druh elektromagnetického záření. Parametr, který udává, jak moc bude těleso pohlcovat nebo tepelně vyzařovat, se nazývá emisivita a v případě použití pro pájení je podstatné, aby byla emisivita zářiče co nejbližší jedné. V takovém případě je velká část energie tělesa vyzářena a deska plošných spojů ji může pohlcovat. Tím se ohřívá a dojde k přetavení pájecí pasty. Tuto metodu lze nalézt u malých levnějších prototypových pájecích pecí. Jako topná tělesa jsou zde využity infrazářiče většinou v podobě keramických trubíc. S technologií ohřevu pomocí IR je možné docílit přesné následování teplotní křivky vlivem nízké setrvačnosti.

Rovnoměrnost ohřevu ale není tak bezproblémová jako u jiných metod a velkou nevýhodou je tvoření stínů. K stínům dochází tehdy, je-li vedle menší součástky na desce umístěna jiná, větší součástka. Velká součástka zastíní infračervené záření a v oblasti jejího stínu nedojde ke správnému přetavení pájecí pasty. Řešení problému začíná správným návrhem desky plošných spojů, kdy musí návrhář rozmístit součástky tak, aby si navzájem co nejméně stínily. Dalším faktorem je konstrukce pájecí pece. Pokud má pájecí pec vícebodové zářiče, je pravděpodobnost tvoření stínů výrazně menší. I tak tato metoda není vhodná pro pájení pouzder BGA, neboť pod pouzdem nedochází k vytvoření kvalitního pájeného spoje. [1; 9; 6]

### 1.2.4 Skupenské teplo

Při ohřevu pomocí skupenského tepla se využívá fyzikální vlastnosti při kondenzaci par. Často je metoda označována jako pájení v parách a skutečně tomu tak v praxi je. Deska plošných spojů je vystavena parám určité látky, nejčastěji fluoru uhlíku. Na povrchu desky

díky její nízké teplotě páry kondenzují a tím předávají skupenské teplo kondenzace. Vzhledem k faktu, že páry kondenzují nejvíce na nejchladnějších místech, je docíleno velmi rovnoměrného ohřevu desky plošných spojů. Dále nedochází k přehřátí, protože teplota par nikdy nebude mít větší teplotu než teplotu varu kapaliny. Změna teploty pájení se provádí změnou pájecí kapaliny, protože každý typ kapaliny má definovanou teplotu varu, která je zároveň teplotou pájení. Další vlastností této metody je samočisticí efekt, kdy z kondenzovaná kapalina zároveň čistí desku plošných spojů, a tak je v mnoha případech možné krok čištění z výrobního procesu vyřadit. Kapalina se ovšem znečišťuje a je třeba ji po určité době vyměnit. Během procesu se část kapaliny také ztrácí a vzhledem k ceně pájecí kapaliny je toto důvod navyšování výrobních nákladů.

Jako příklady pájecí kapaliny poslouží produkty značky SOLVAY řady Galden LS a HS, jejichž vybrané parametry jsou uvedeny v tabulce 2. Tato metoda, ačkoliv má mnoho výhod, má také zásadní problém, a tím je tvoření bublinek pod součástkami, takzvaných voidů. Při pájení se může část par dostat pod větší pájecí plochy součástek a při uzavření těchto par v roztavené pájce nedojde k vytvoření kvalitního spoje. Vzhledem k faktu, že velké pájecí plochy se využívají zejména k chlazení součástek, je toto problém a při nastavování procesu pro výrobní sérii je třeba, aby byly vytvořeny rentgenové snímky kritických spojů prvních kusů desek a proces byl náležitě odladěn. [1; 12]

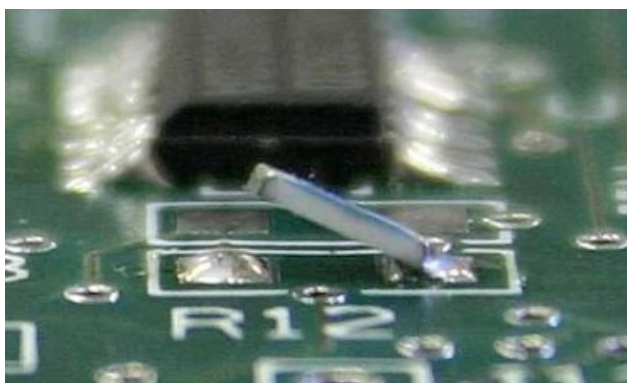
**Tabulka 2 - Vybrané vlastnosti pájecích kapalin Galden LS a HS [12]**

Vlastnost	Jednotka	LS200	LS215	LS230	HS240	HS260
Bod varu	°C	200	215	230	240	260
Hustota	g/cm <sup>3</sup>	1,79	1,8	1,82	1,82	1,83
Měrná tepelná kapacita	J/Kg*°C	973	973	973	973	973
Tepelná vodivost	W/m*°C	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Tlak par	Pa	21	12	3,4	1	1
Koeficient expanze	cm <sup>3</sup> / cm <sup>3</sup> *°C	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011	0,0011
Kinematická viskozita	cSt	2,5	3,8	4,4	5,3	7

### 1.2.5 Komplikace spojené s pájením přetavením

Při navrhování desky plošných spojů se velikosti plošek pro pájení součástek odvíjí od plánované metody. V momentě, kdy konstruktér zvolí metodu pájení přetavením, je nutné, aby navrhnul pájecí plošky menší a co nejvíce umístěné přímo pod součástkami. Během pájecího procesu totiž působí na součástky síly povrchového napětí roztavené pájky a mohou se kvůli tomu mírně pohybovat. Tento jev má své výhody i nevýhody. Kladným efektem je samovolné srovnání součástek přesně na pájecí plochy. Negativním efektem pak je pravděpodobnost vzniku náhrobních kamenů (obrázek 6), což je označení pro součástku, která se vlivem povrchového napětí naklopí na hranu a druhá ploška zůstane nezapájená. Stává se to zejména u čipových pasivních součástek jako jsou rezistory, kondenzátory a indukčnosti v čipových pouzdrech, například 0805, 1206 a další. Mezi vlastnosti, které

zvyšují pravděpodobnost výskytu náhrobních kamenů, patří nekvalitní pájecí pasta, špatná smáčivost plošek nebo vývodů součástek a nerovnoměrný ohřev. [13]



**Obrázek 6 - Efekt náhrobních kamenů [13]**

Dalším úskalím při pájení přetavením je tepelné namáhání. Při ohřevu na vysoké teploty, které jsou potřeba k roztavení pájky, dochází k tepelnému rozpínání materiálu. Podstatné však je, že měď, která se používá pro vodivé spoje, a sklolaminát, který se používá jako nosič, mají odlišný koeficient teplotní roztažnosti. Dochází tedy k mechanickému namáhání a v krajních případech může dojít k prasklinám v materiálech. Nejkritičtějším místem jsou prokovené otvory a jejich napojení na vnitřní vrstvy desky plošných spojů. Zamezit mechanickému poškození při pájení lze vhodným návrhem a volbou materiálů. [1; 9]

### **1.3 Pájecí pasty**

Při pájení elektronických dílců uvažujeme pouze měkké pájení, které je charakterizováno teplotou tavení do 450 °C. Pájecí pasta je směsí tavidla a kuliček nebo prášku pájky. Dle hrubosti pájky se liší jednotlivé produkty. Zrovna tak se liší použitým tavidlem a tyto parametry předurčují vlastnosti, použití a teplotní profil. Pájky používané v elektrotechnice se rozdělují na olovnaté a bezolovnaté. Výhradně jsou to pájky cínové s obsahem dalších materiálů pro zlepšení konkrétních vlastností pájení a výsledného spoje. Sledovanými parametry jsou smáčivost a vzlínavost roztavené pájky. Po zchlazení je důležitá časová stálost spoje, jeho pevnost a elektrická spolehlivost. [2]

#### **1.3.1 Olovnaté**

Jako olovnatá pájka se označuje cínová pájka pro elektroniku s příměsí olova. Je dlouhodobě používána, díky svým pozitivním vlastnostem. Eutektikum cínu a olova vzniká při obsahu cínu 61,9 % a při teplotě 183 °C. Takováto pájka je vhodná pro elektroniku, protože má významně nízký bod tavení a nedochází tak k tepelnému namáhání elektronických součástek a materiálů. Díky vysokému obsahu cínu je zachována i vysoká elektrická vodivost. Příkladem olovnaté pájecí pasty může být typ SMD291AX10 od výrobce CHIPQUIK. Tato pájecí pasta má teplotu tání 183 °C a skládá se z cínu a olova v poměru 63 ku 37. Na hmotnost pasty připadá 88 % pájky a zbytek je hmotnost tavidla. Prodává se ve stříkačkách o hmotnosti 35 g. Při skladování v lednici o teplotě 3 až 8 °C je minimální doba trvanlivosti dvanáct měsíců. Produktový list také udává informaci o době, která může uběhnout mezi

aplikováním pasty a přetavením. Tato doba je až osm hodin při pokojové teplotě a relativní vlhkosti do 50 %. Při nanášení pasty tiskem jsou zde i parametry pro tiskovou hlavu. Nechybí ani údaje o hrubosti zrn pájky a mnoho dalších důležitých informací.

Kvůli toxicitě olova a jeho negativním vlivům na duševní vývoj dospívajícího jedince je snaha o omezení jeho použití, zvláště pak ve spotřební elektronice, která může velmi často olovem kontaminovat životní prostředí a ohrozit tak nové generace. Omezením se zabývá Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních (přepřelované znění) Text s významem pro EHP. Tato směrnice definuje, kde se nesmí olovo vyskytovat a zároveň uvádí určité výjimky. Použití olova v pájkách je tak možné v případech uvažovaných v samotné směrnici. Jako příklad může být uvedeno povolené použití v pájkách pro servery, paměti, telekomunikační zařízení a systémy pro ukládání dat. Hlavním důvodem je menší tepelné namáhání při pájení a větší časová stálost a spolehlivost spoje, v kontrastu bezolovnatých pájek. Z toho důvodu je olovo povoleno i v přenosných defibrilátorech, které jsou při manipulaci vystaveny otřesům a nárazům a jejich selhání může mít fatální následky. Dále je olovo povoleno v některých součástkách, kde je pro výrobu nezbytné. [2; 14; 15; 16]

### 1.3.2 Bezolovnaté

Jak již bylo zmíněno výše, olovo v pájkách se začalo omezovat a upřednostňují se bezolovnaté pájky, což jsou cínové pájky s dalšími příměsmi. Ačkoliv neustále probíhá experimentování s příměsmi, aby se dosáhlo stejných parametrů jako u olovnaté pájky, nepodařilo se zatím dorovnat všechny vlastnosti společně. Existuje tak relativně velké množství bezolovnatých pájek s různými příměsmi a každá slitina má své výhody a nevýhody. Příkladem bezolovnaté pájecí pasty budiž typ s názvem SMD291SNL10 od výrobce CHIPQUICK. Tato pájecí pasta je složena z 96,5 % cínu, 3 % stříbra a z 0,5 % mědi. Bod tání se nachází okolo 218 °C. To je více v porovnání s olovnatou pájkou. Oproti olovnaté pájce má také menší trvanlivost, a to šest měsíců. Parametry jako hmotnost balení, poměr pájky a tavidla a životnost nanášené pasty jsou podobné jako v předchozím případě. Je zde ale důležitá poznámka, že pájecí pasta splňuje směrnici RoHS 2011/65/EU. [17]

### 1.3.3 Tavidla

Tavidla mají při pájení několik funkcí. Mezi nejdůležitější funkce patří podpora smáčení materiálů a rozpouštění povrchových oxidů. Na povrchu kovů se totiž vytvářejí oxidy, které jsou ve většině případů těžko tavitelné a znemožňují vytvoření kvalitního pájeného spoje. Aplikované tavidlo tyto oxidy, pokud možno, co nejrychleji rozpustí a zabrání tvorbě nových. Jak je patrné, zabránění tvorbě oxidů lze i zamezením přístupu kyslíku během pájení, čehož lze docílit ochrannou atmosférou. Ta ovšem neodstraní již vytvořené oxidy na povrchu materiálu. Tavidla jsou nedílnou součástí pájecích past a výrobce musí vhodně zvolit typ tavidla, respektive jeho reakční teplotu, aby bylo účinné ještě před roztavením samotné pájky. Obsluha pájecí pece musí zase správně nastavit teplotní profil pájení, aby nedošlo k vyprchání účinných látek v tavidle ještě před roztavením pájky. Pokud by proces přetavení byl naopak moc rychlý, tavidlo by nestihlo včas reagovat s oxidy a tím je odstranit.

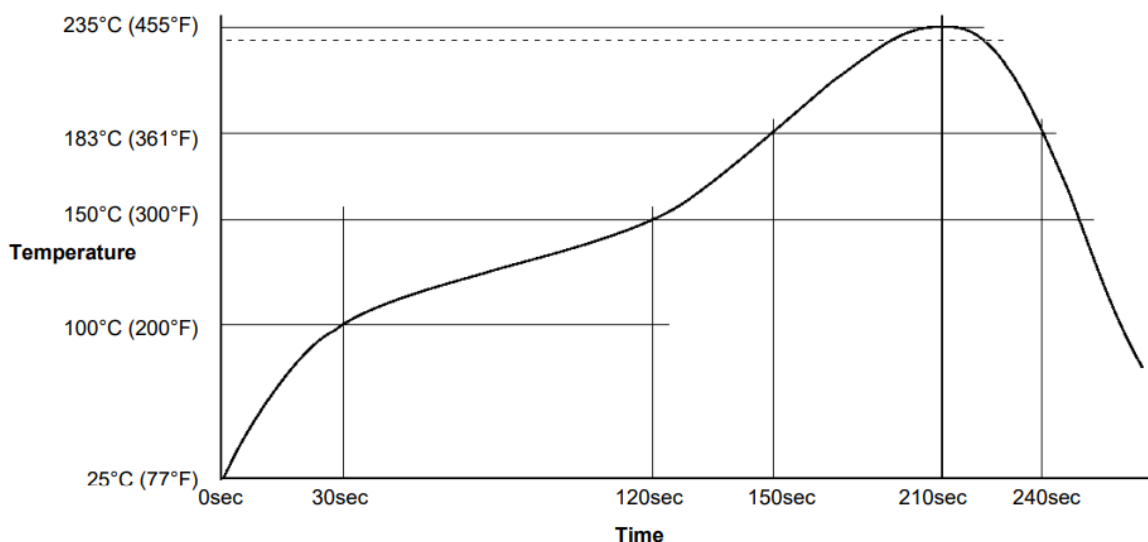
Dalšími požadavky na tavidla jsou správná viskozita, konstantní povrchové napětí, zdravotní nezávadnost a snadná odstranitelnost po vychladnutí spoje. Dále musí mít tavidlo při své aplikační teplotě menší hustotu než roztavená pájka, aby došlo k vyplavení nečistot na povrch spoje. Při pájení přetavením se používají pastovitá tavidla smíchaná s vlastní pájkou. Další konzistence jsou například prášek, plyn, roztok, nebo emulze. [2]

## 1.4 Teplotní profily

Teplotní profil je reprezentován grafem nebo několika definovanými body. Určuje, jak by se měla měnit teplota v průběhu pájení pro dosažení kvalitního mechanického a elektrického spojení. Přesné následování teplotního profilu během pájení je klíčové pro vytvoření spolehlivého elektrického a mechanického spoje.

### 1.4.1 Teplotní profil olovnaté pájky

Uvedený teplotní profil olovnaté pájky na obrázku 7 je vyjmut z produktového listu výrobku SMD291AX10 od výrobce CHIPQUIK. Jak je vidět, v grafu se nachází několik bodů, kterými je nutné při pájení přetavením co nejpřesněji procházet. Vždy musí být aktuální teplota v určený čas co nejbližší doporučené teplotě pro daný čas od počátku pájení. Pájení s touto konkrétní pastou by mělo trvat přibližně čtyři minuty. Špičková teplota pro spolehlivé přetavení je určena na 235 °C, ačkoliv teplota tání pájky je již 183 °C. V profilu si lze povšimnout náběhu teploty a následné srovnání případných tepelných gradientů. Poté dochází k aktivaci tavidla a prudkému nárůstu teploty, kdy dojde v přetavení pájky. Po dosažení maximální doporučené teploty jsou již všechny součástky zapájeny a přichází na řadu chlazení. [16]

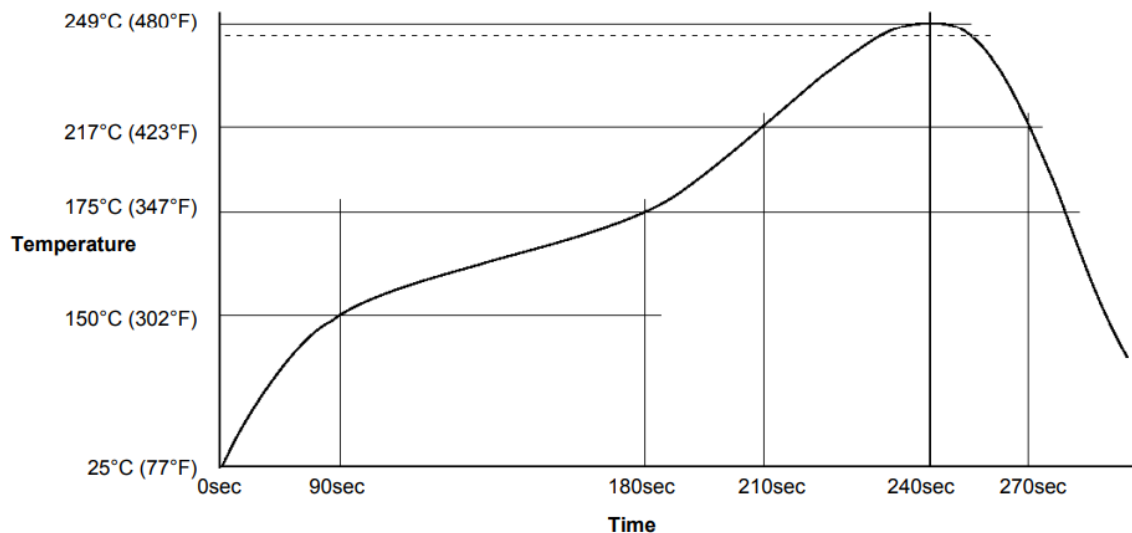


Obrázek 7 - Teplotní profil pro olovnatou pájecí pastu SMD291AX10 [16]

### 1.4.2 Teplotní profil bezolovnaté pájky

Uvedený teplotní profil bezolovnaté pájky na obrázku 8 je vyjmut z produktového listu výrobku SMD291SNL10 od výrobce CHIPQUIK. Při porovnání s předchozím profilem pro olovnatou pájku je tento profil pro bezolovnatou pájku rozdílný v maximálních

hodnotách. Pájení zde trvá čtyři minuty a třicet vteřin a maximální teplota je zde až 249 °C. Součástky jsou opravdu více tepelně namáhány v porovnání s pájením olovnatou pájkou. Ovšem díky neustálému zlepšování pájek a tavidel je rozdíl již tolerovatelný. [17]



Obrázek 8 - Teplotní profil pro bezolovnatou pájecí pastu SMD291SNL10 [17]

## 1.5 Ochranná atmosféra

V poslední době se začíná stále více zavádět pájení přetavením v ochranné atmosféře. Jako ochranná atmosféra se používají inertní plyny, zejména dusík nebo argon. Hlavním důvodem použití je snížení množství tvořených oxidů na pájce v průběhu procesu přetavení. To výrazně zvyšuje smáčivost použité pájky. Možné je také použití vakua jako ochranné atmosféry, ovšem nutnost dokonalého utěsnění během pájení a zdlouhavé vyčerpávání vzduchu zpomaluje celý proces. S nutností použití bezolovnatých pájek ve většině aplikací je ochranná atmosféra jednou z možností, jak zajistit kvalitní pájené spoje při výrobě. Možnost použití ochranné atmosféry mají především velké dopravníkové pájecí pece určené pro velkosériovou výrobu. [1; 2; 3]

## 2 Regulace topných těles

### 2.1 Měření teploty

Snímač teploty je vstupním prvkem regulačního řetězce. Pro potřeby této práce byly vynechány metody výrazně zastaralé jako například snímání teploty rtuťovým teploměrem s elektrickým kontaktem nebo metody, které nevytvářejí změny na veličinách, běžně zpracovatelných a převoditelných na elektrický signál.

#### 2.1.1 Bimetalový pásek

Při zahřívání kovů se projeví vlastnost nazvaná teplotní roztažnost. To znamená, že pokud těleso tvaru tyče zahřejeme na vyšší teplotu, než byla původní, dojde k prodloužení tyče. Materiálový parametr, který určuje velikost teplotní roztažnosti, se jmenuje teplotní součinitel délkové roztažnosti a je pro každý materiál jiný. Nyní konečně k bimetalovému pásku. Z názvu bimetal je patrné, že se jedná o spojení dvou kovů, přesněji dvou rozdílných kovů s rozdílným teplotním součinitelem délkové roztažnosti. Při zahřátí takového pásku se pak různé prodloužení jednotlivých kovů projeví jako ohyb celého pásku. I při velmi malé změně délky tak lze pozorovat výrazný ohyb a pomocí tohoto pohybu ovládat například elektrický kontakt. Takto jsou dodnes tvořeny některé termostaty. Pásek se vlivem zahřátí ohýbá do bodu, kdy přeskočí napružený plíšek a přepne tím elektrický kontakt. Při chladnutí se s určitou hysterezí plíšek narovná a kontakt se přepne nazpět. Snímací prvek tak zastává i funkci dvoupolohového regulátoru a lze takto regulovat i teploty ve stovkách stupňů celsia. Pro použití v pájecí peci však tento způsob není příliš vhodný, neboť přesnost nastavené teploty je velmi omezená a nelze jednoduše měnit požadovanou teplotu v čase. [10; 11; 9]

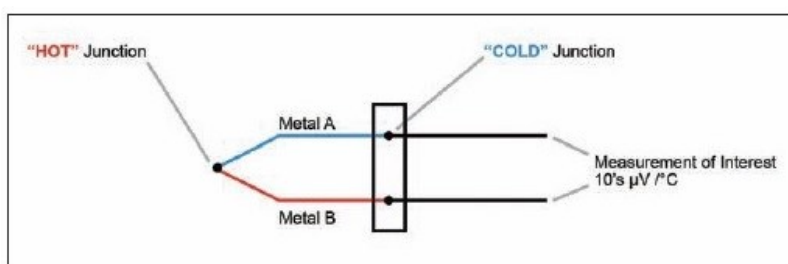
#### 2.1.2 Termočlánek

Termočlánek pracuje na termoelektrickém jevu. Tvoří ho dva vodiče z různých kovů spojených metalurgickým procesem. Z podstaty připojení termočlánku vznikají vlastně termočlánky dva. Označují se jako studený a teplý konec nebo také měřicí a referenční spoj. K vidění na obrázku 9. Při rozdílných teplotách měřicího a referenčního spoje vzniká na termočlánku napětí. V dřívějších dobách se studený spoj udržoval na teplotě 0 °C a to tím, že byl ponořen do ledové tříště. Odtud název studený spoj. Napětí na termočlánku bylo tak vztaženo k počátku celsiovy teplotní stupnice, ale tato metoda není vhodná pro měření teploty v automatizaci a průmyslu.

Moderní obvody, zpracovávající termoelektrické napětí, mají na studeném spoji jiný teplotní senzor, většinou polovodičový. Řídicí obvod, který zná referenční teplotu a měřenou teplotu, si dopočítá z termoelektrického napětí. Studený spoj tak může mít pokojovou, či venkovní teplotu. Stále je však vhodné, aby se referenční teplota nepohybovala ve velkých rozmezích. Napětí generované termoelektrickým jevem je závislé na použitých materiálech. Ty také určují teplotní rozsah a díky mnoha typům termočlánků je možné měřit teploty od -200 do 2500 °C. Snímací prvek je také extrémně odolný mechanickému poškození a má velmi malou časovou konstantu odezvy na změnu teploty, což je zvláště pro pájecí pec výhodné. Díky tomu, že termočlánky jsou aktivní čidla, nedochází u nich k samo ohřívání vlivem

procházejícího proudu a tím ke tvoření systematické chyby. Mezi určité nevýhody tohoto čidla se řadí náročné zpracování napěťového signálu, protože velikost napětí je velmi malá a pro zpracování analogově digitálním převodníkem je nutné použít velkého zesílení.

Přesnost celé měřicí soustavy pak závisí jak na kvalitě metalurgického spojení samotného čidla, tak i na linearitě a stabilitě zesilovacích prvků a převodníku. Sestava je také výrazně citlivá na šum. Je proto nutné důrazně řešit EMC a zavést kroky k omezení vlivu šumu, jako je stínění a kroucení vodičů termočlánek. Díky velké rozšířenosti termočláneků došlo k normalizaci značení. Díky tomu je snadné vybrat vhodný typ pro danou aplikaci a zajistit dodávku od různých výrobců. Pro použití v pájecí peci je termočlánek velmi vhodný, zvláště kvůli časové odezvě, odolnosti a teplotním rozsahům. [10; 18; 19]



Obrázek 9 - Typická struktura měření termočlánekem [20]

### 2.1.3 Odporový snímač

Odporový snímač je ve svém principu založen na jednoduchém fyzikálním ději, a to na závislosti odporu vodiče na teplotě. Výpočet odporu při konkrétní teplotě lze provést podle vzorce (1), kde  $R_0$  je odpor při  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .  $\alpha$  je teplotní koeficient odporu, který je materiálovou konstantou.  $\Delta T$  je rozdíl teplot a  $R_\vartheta$  je výsledná hodnota odporu při uvažované teplotě.

$$R_\vartheta = R_0 * (1 + \alpha * \Delta T); [\Omega] \quad (1)$$

Jak je patrné, požadavky na materiály vhodné na výrobu odporových teplotních čidel jsou velký měrný odpor, velký charakteristický teplotní koeficient a jeho malá teplotní závislost. V praxi se lze setkat výhradně s platinovými, niklovými a iridiovými teplotními čidly. Jejich značení a jmenovité hodnoty jsou normovány. Písmena v názvu označují materiál, ze kterého se čidlo skládá a číslice označují hodnotu odporu při  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Například hojně používaný snímač Pt100 znamená, že je vyroben z platiny a jeho jmenovitý odpor je  $100\ \Omega$ . Ze svého principu mají tato čidla velký pracovní rozsah teplot a výbornou linearitu. Změna odporu se změnou teploty je však velmi malá, a tak je náročnější i samotné zpracování signálu. Musí se docílit minimálního vlivu rušení. V opačném případě by se při nutném velkém zesílení užitečný signál ztrácel. Dále mají významný vliv na snímání teploty i přívodní vodiče. Omezení jejich vlivu se řeší třívodičovým zapojením. Zde se odpor přívodních vodičů projeví na obou stranách měřicího můstku, a tak se navzájem vyruší. S odporovým typem čidel lze zajistit velmi přesné měření teplot. [10; 21; 19]

### 2.1.4 Termistor

Termistor je polovodičová součástka s odporem závislým na teplotě. Rozdělit termistory lze na dvě kategorie, NTC neboli termistory s negativní závislostí na teplotě a PTC, což jsou termistory s pozitivní závislostí, přičemž pro snímání teploty se využívají zejména NTC, protože mají vhodnější charakteristiku a tato kapitola se tak bude zabývat výhradně jimi. Termistor se vyrábí spékáním polovodičových zrněk a díky chybám v krystalické mřížce dochází při změně teploty termistoru ke změně vedení proudu v polovodiči. Podle konkrétního typu má termistor sedmkrát až čtrnáctkrát větší změnu odporu při změně teploty než odporová čidla. Výhodou tedy je, že změna odporu je v rozsahu změn teplot výrazná a je snazší zpracovat vznikající, nejčastěji napěťový, signál.

Tato teplotní čidla bývají také jedna z nejlevnějších, což šetří výrobní náklady. Na druhou stranu nevýhodou NTC teplotních čidel je větší tolerance a špatná časová stálost. Vlivem výrobního procesu je velmi obtížné vyrábět termistory s totožnou charakteristikou. To snižuje přesnost měření teploty v koncové aplikaci, pokud pomineme možnost kalibrace každého jednoho vyrobeného kusu. Vlivem stárnutí se také výrazně mění závislost odporu na teplotě, a tak jsou termistory předurčené k levnějším aplikacím ve spotřební elektronice nebo tam, kde není kritická vysoká přesnost. Například havarijní teplotní čidla v moderních plynových kotlích. [22; 21]

## 2.2 Převod analogové hodnoty na digitální

Jelikož regulátor je ve většině případů realizován v mikrokontroleru v číslicové formě, je třeba spojit analogové hodnoty z čidel zpracovat a převést na digitální číslo. K tomu slouží analogové digitální převodníky a lze podle aplikace upřednostnit různé parametry. Někdy je důležitá stabilita nebo nízký šum. Jindy je třeba zajistit nízkou pořizovací cenu AD převodníku, nebo co největší počet bitů neboli rozlišení převodníku. Převodníky mohou být samostatné součástky komunikující s mikroprocesorem přes standardizovanou sběrnici nebo mohou být součástí jiných integrovaných obvodů. Například mikroprocesor nebo i různé specializované čipy pro zpracování signálu mají zabudovaný AD převodník. [19; 23]

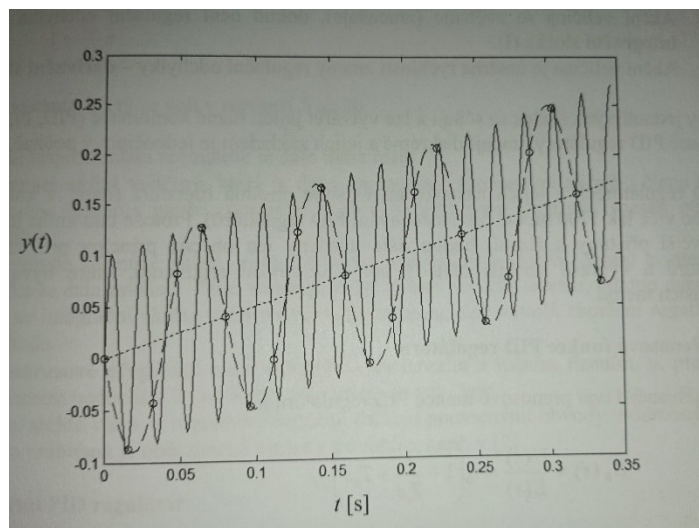
### 2.2.1 Parametry převodníku

Při výběru vhodného převodníku je zapotřebí brát v úvahu několik vlastností a parametrů. První parametr je počet bitů převodníku. Tento parametr udává rozlišení a nejčastěji se počet bitů pohybuje v rozmezí osmi až dvanácti. Celkový počet úrovní, které dokáže převodník rozlišit lze zjistit umocněním dvojky na počet bitů. Například pro desetibitový převodník vyjde počet úrovní 1024. S tím blízkce souvisí referenční napětí. To může být požadované externě nebo může být implementováno uvnitř převodníku. Referenční napětí by mělo být co nejstabilnější, protože při kolísání dochází ke změnám absolutních rozhodovacích napětí a tím ke zkreslení výsledku převodu. Pro zjištění absolutního kroku převodníku je třeba referenční napětí vydělit počtem úrovní. Při uvažovaném příkladu desetibitového převodníku s referenčním napětím jeden volt by absolutní krok byl přibližně jeden milivolt. To se označuje jako kvantizační krok a je to rovno hodnotě napětí pro nejméně významný bit. Celkový převod může být zatížen několika chybami. Chyba nuly označuje, že výstupní

číslo nula neodpovídá vstupnímu nulovému napětí. Tato chyba je velmi častá, a proto je vhodné nevyužívat převodník v blízkosti krajních hodnot vstupních napětí. Chyba zesílení znamená postupnou změnu absolutní hodnoty napětí nejmenšího kroku v průběhu rozsahu. Dále se lze setkat s integrální a diferenciální nelinearitou. Tyto nelinearity způsobují odchylku od ideálního převodu v rozsahu převodníku. Zmíněné chyby lze kvalitní výrobou a návrhem potlačit, ovšem kvantizační chyba je vlastnost analogově digitálního převodu a je třeba ji vždy brát v úvahu. Lze ji označit jako chybu zaokrouhlováním. U převodníku je dalším důležitým parametrem vlastní šum. Při citlivých měřeních může znehodnotit a zkreslit převáděnou hodnotu. Pro zakomponování převodníku do obvodu je třeba znát způsob jeho časování a formu digitálního výstupu. Časování může být řešené interně nebo může být potřeba připojení vnějšího hodinového signálu. Převodník pak převádí synchronně se signálem na vstupu. S tím souvisí zmíněná komunikace s okolím. Některé převodníky konstantně převádějí vstupní hodnotu a na svém výstupu neustále generují digitální číslo, které si řídicí obvod musí číst. Jsou i převodníky, které spustí pouze jeden převod na pokyn od sběrnice a následně na sběrnici vyšlou výslednou hodnotu zpět ve formě sériové posloupnosti bitů. V poslední řadě je třeba, aby korespondovala maximální vzorkovací rychlost s potřebnou vzorkovací rychlostí uvažované aplikace, jak je popsáno v následující kapitole. [19; 23]

### 2.2.2 Vzorkování a kvantování

Vzorkování analogové hodnoty je důležitým prvkem pro funkci A/D převodníku. Frekvence vzorkování a jeho provedení může výrazně ovlivnit celkové vlastnosti a kvalitu převodu. Je potřeba, protože analogový signál je spojitý v čase i v hodnotě. Může tedy nabývat nekonečně mnoha hodnot v každém okamžiku. Naproti tomu digitální signál nabývá omezeného množství hodnot v přesně definovaných časových úsecích. Vzorkování tedy mění spojitý čas na posloupnost vzorků, které jsou následně kvantovány neboli zaokrouhleny na nejbližší kvantovací hodnotu. Konkrétně bývá obvod vzorkování realizován jako analogová paměť sample and hold. Nejčastěji je použit kondenzátor a jeho sepnutím na vstupní signál se nabije na hodnotu napětí shodnou s přivedeným signálem. Následně je od vstupní části odpojen a připojí se na samotný převodník, který zahájí kvantování. Pokud se tedy na vstupním signálu během kvantování změní hodnota napětí, neovlivní to samotný převod, protože napětí pro převodník je bráno z analogové paměti. To je velmi důležité, neboť by jinak docházelo ke zkreslení převodu. Na vzorkování se vztahuje Nyquistův–Shannonův vzorkovací teorém, který říká, že pro správnou interpretaci vstupního signálu je nutné, aby frekvence vzorkování byla alespoň dvakrát větší než maximální frekvence signálu. V opačném případě dochází k aliasingu, který je k vidění na obrázku 10. Vzhledem k relativně pomalým dějům v pájecí peci není toto pravidlo pro uvažované použití podstatné, neboť veškeré dostupné AD převodníky mají vzorkovací maximální frekvenci mnoho řádově vyšší, než je frekvence změn teploty. [19; 23]

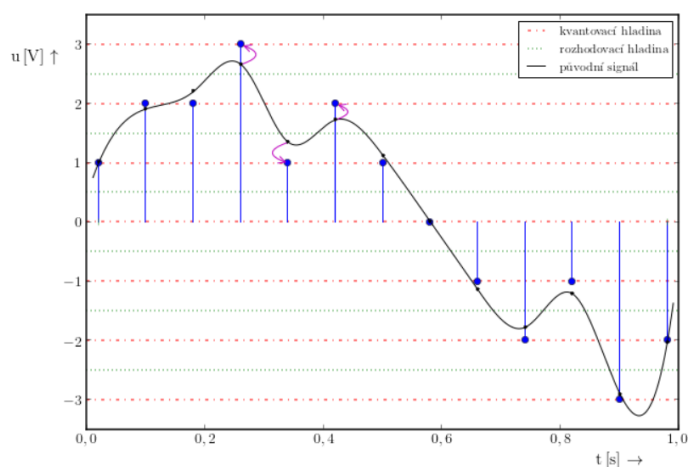


Obrázek 10 - Aliasing [24]

Analogová hodnota nespojitá v čase, ale spojitá v amplitudě, se tedy přiřadí k nejbližší kvantovací hodnotě. Počet úrovní hodnot je dán počtem bitů převodníku a skutečná velikost napětí odpovídající danému digitálnímu číslu je předurčena referenčním napětím. Výslednou hodnotu, kterou A/D převodník přiřadí určitému napětí, je možné spočítat podle následující rovnice (2).

$$D = \frac{U_{vst}}{U_{REF}} * 2^N, [-] \quad (2)$$

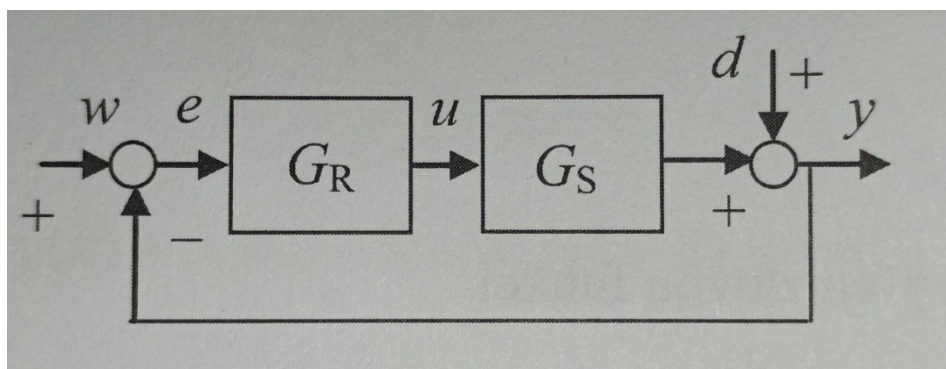
Kde D je výsledné digitální číslo.  $U_{vst}$  je vstupní napětí převodníku a  $U_{REF}$  je referenční napětí. N je poté počet bitů převodníku. Z výpočtu je patrné, že vstupní napětí nesmí přesáhnout hodnotu napětí reference. Pro takové hodnoty je převodník saturován a trvale vykazuje na výstupu nejvyšší digitální číslo dané jeho počtem bitů. Grafické znázornění kvantování a vzorkování analogového signálu je k vidění na obrázku 11. [24; 25; 19]



Obrázek 11 - Znázorněné kvantování a vzorkování [25]

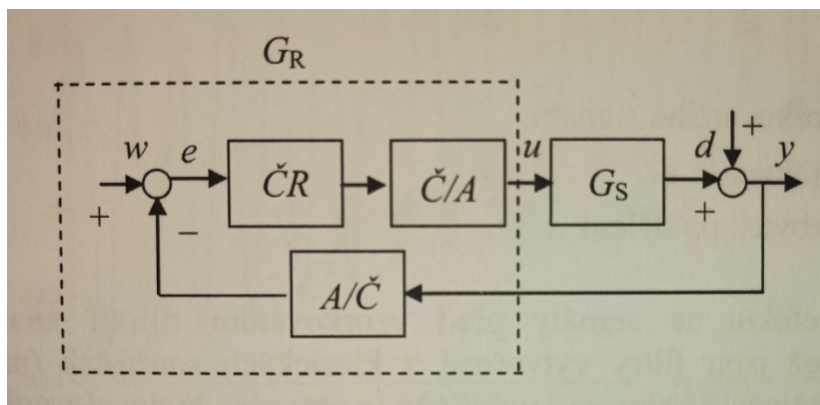
## 2.3 Typy realizace regulace

Typ zvolené regulace pro účel pájecí pece výrazně ovlivňuje výslednou kvalitu celého výrobku a konkrétně odchylku skutečné teploty od té nastavené. Vzhledem k náchylnosti pájecího procesu ke kolísání teploty je nutné, aby regulace byla co nejpřesnější. Zároveň je třeba relativně rychlý nárůst teploty při fázi přetavení, a proto musí být regulátor také rychlý. Tyto dva požadavky se částečně vylučují, a proto je výsledná přechodová charakteristika kompromisem. Regulátor lze ponechat s překmitem, pokud hodnota špičkové teploty a její doba trvání nepoškodí součástky, desku plošných spojů nebo nepřekročí maximální dovolenou teplotu pro pájecí pastu. Překmit regulované veličiny je v tomto případě přijatelnější než pomalý náběh, neboť dochází k delšímu tepelnému namáhání součástek a překročení doby aktivace tavidla. Lze pominout ovládání neboli přímovazební řízení, neboť pro uvažované použití se nehodí. Vhodný způsob udržování regulované veličiny na žádané hodnotě je zpětnovazební regulace. Uzavřený regulační obvod je na obrázku 12.



Obrázek 12 - Uzavřený regulační obvod [24]

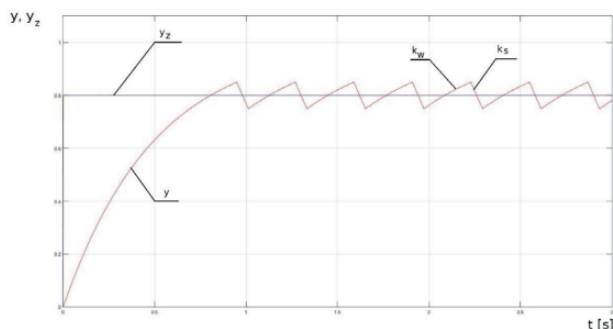
Na obrázku znamená písmeno  $w$  požadovanou hodnotu regulované veličiny,  $e$  je regulační odchylka,  $u$  je akční zásah,  $d$  je vnější vliv,  $y$  je skutečná regulovaná veličina. Regulační odchylku  $e$  je třeba snížit na co nejmenší hodnotu. Toho se snaží regulátor ( $G_R$ ) docílit změnou akčního zásahu. Někdy typ akčního členu přímo předurčuje způsob jeho regulace. Regulovaná soustava ( $G_S$ ) na změnu akční veličiny reaguje určitým způsobem a může se projevit například i dopravní zpoždění. Níže budou popsány dva základní a nejpoužívanější typy regulace tepelné soustavy. Díky těmto poznatkům bude v praktické části vybrán typ, který se pro uvedený účel hodí nejlépe. Vzhledem k faktu, že pájecí pec bude ovládána mikropočítačem, bude rovnice regulátoru vepsána do programu a analogová veličina bude muset být převedena analogově digitálním převodníkem na digitální číslo. Taková regulace se nazývá diskrétní a regulační pochod je ovlivňován frekvencí vzorkování. Číslicový regulační obvod je na obrázku 13, kde lze vidět, že do soustavy vstupují nové členy a to A/D a D/A převodníky (zde A/Č a Č/A jako analogově číslicový převodník). Pokud lze akční člen řídit přímo digitální veličinou nebo jiným signálem, který lze generovat přímo mikropočítačem, je možné digitálně analogový převodník vynechat. [24]



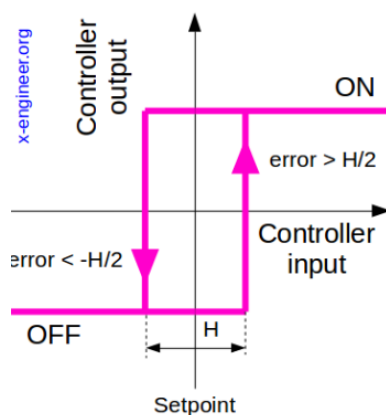
Obrázek 13 - Regulační obvod s číslicovým regulátorem [24]

### 2.3.1 Dvoupolohová regulace

Dvoupolohová regulace je velmi jednoduchá na realizaci i nastavení. Jedná se o nespojitou regulaci. Akční člen je přestavován do dvou krajních poloh, například otevřeno a uzavřeno. Vždy, když je žádaná hodnota větší než skutečná měřená hodnota, dojde k nastavení logické 1 na výstupu regulátoru. Naopak pokud je žádaná hodnota menší, je nastavena logická 0. Tím je docíleno kmitání regulované veličiny okolo nastavené hodnoty. Rozkmit je dán jednak dopravním zpožděním systému, ale hlavně také nastavenou hysterezí regulátoru. Ta se nastavuje hlavně z důvodu ochrany akčního členu, protože ve většině případů by docházelo v okolí nulové regulační odchylky k velmi častému přestavování akční veličiny. Jako příklad může být uveden prostorový regulátor vytápění. Bez hystereze by při dosažení nastavené teploty začal regulátor vypínat a zapínat kotel i při nepatrné změně teploty. Proto se v praxi volí hystereze až 1 °C. Při nastavené teplotě 21 °C tak regulátor sepne vytápění při poklesu pod 20,5 °C, a naopak vypne vytápění při přesáhnutí 21,5 °C. Vlivem setrvačnosti tak dochází k spínání vytápění v řádu jednotek a nižších desítek za den. Tato regulace je velmi levná na realizaci a s výhodou se používá v aplikacích, kde z principu nevádí kolísání okolo žádané hodnoty a není kladen důraz na co největší přesnost. Regulace tepelných systémů jsou nejběžnějším použitím. Dvoupolohový regulátor se v automatizaci označuje často jako relé. Na obrázku 14 je typická odezva systému s dvoupolohovým regulátorem na jednotkový skok. Na obrázku 15 je znázorněna závislost výstupu na vstupu regulátoru. Písmeno H označuje hysterezi. Závěrem je vhodné podotknout, že u pájecích pecí se dvoupolohová regulace příliš často nevyskytuje, protože je potřeba velmi přesně dodržovat teplotní profil a tím pádem jsou na regulace kladeny velké nároky. [26]



Obrázek 14 - Odezva regulátoru na jednotkový skok [26]



Obrázek 15 - Přenosová charakteristika dvoupolohového regulátoru [27]

### 2.3.2 PID regulace

Regulace nazývaná PID je jednou z prvních spojitých regulací a dodnes patří mezi nejvyužívanější. To je zapříčiněné hlavně vlastnostmi dostačujícími ve většině běžných aplikací. Dále patří mezi výhody jednoduchost a nízký požadavek na výpočetní výkon v porovnání na příklad s prediktivním nebo adaptivním řízením. PID regulace se skládá ze tří členů, které se sčítají. Proporcionální člen označovaný P zajišťuje, že výstupní veličina je přímo úměrná regulační odchylce. Integrovaný člen označovaný písmenem I zajišťuje zvětšování akčního zásahu, dokud není odstraněna regulační odchylka. Poslední člen má písmeno D a označuje se derivační. Tento člen udává, že akční zásah je úměrný rychlosti změny regulační odchylky. Podle [24, s. 44] je nejpoužívanějším tvarem přenosové funkce (3).

$$G_R(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), [-] \quad (3)$$

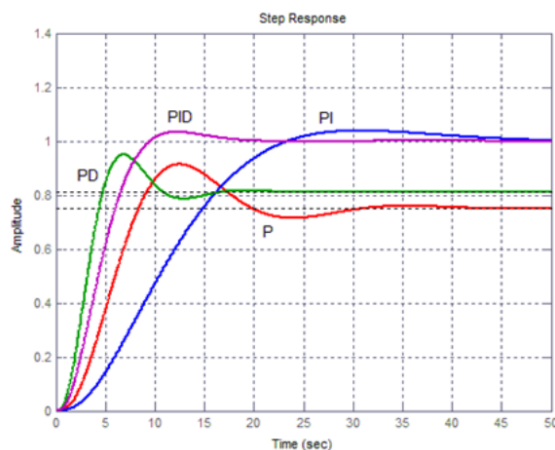
Kde  $r_0$  znamená zesílení,  $T_i$  je integrační časová konstanta a  $T_d$  je derivační časová konstanta. V časové oblasti lze toto vyjádřit jako (4).

$$u(t) = r_0 \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], [-] \quad (4)$$

Ačkoliv PID regulaci lze z principu vytvořit čistě analogovými elektrickými obvody nebo dokonce mechanicky, v posledních letech se přistupuje k vytváření digitálních PID regulací. Analogová měřená veličina regulované soustavy se převede AD převodníkem na digitální číslo. Žádaná hodnota je většinou již nastavena na základě jiných požadavků v řídicím systému, který je realizován mikroprocesorem, či jiným výpočetním zařízením, jako je třeba PLC. Rovnice regulace je interpretována do programu. Pro diskrétní regulaci je vhodné používat přírůstkový tvar regulátoru. Odstraní se tím potřeba sčítat všechny předešlé regulační odchylky u sumačního členu.

Vytvoření integrace v mikroprocesoru je obtížné, a tak se nahrazuje sumou. Regulátor se pak značí PSD. Derivační člen se nahrazuje diferencí. Akční zásah v podobě digitálního čísla se převádí na analogovou hodnotu pomocí DA převodníku. Při navrhování PID regulace realizované v programu mikroprocesoru je vhodné, aby byly vstupní hodnoty normalizovány. To znamená, že se aktuální hodnota vstupu vydělí maximální hodnotou vstupu a výsledné číslo je v rozmezí 0 až 1. Tím lze zamezit problémům s přizpůsobením velikostí hodnot od různých prvků.

Spojité regulátor nemusí obsahovat všechny složky. Lze realizovat samotný proporcionální regulátor, proporcionálně integrační nebo také proporcionálně derivační regulátor. Jsou totiž aplikace, kde není kompletní PID regulátor potřeba. Například pokud jsou změny vstupních veličin velmi pomalé a nesmí se v systému objevit trvalá regulační odchylka, je vhodné zvolit PI variantu. Pokud naopak je třeba reagovat na prudké změny, ale lze tolerovat trvalou regulační odchylku, je vhodný PD regulátor. Odezvy na jednotkový skok zmíněných druhů spojitě regulace jsou na obrázku 16.



Obrázek 16 - Odezvy různých variant regulátorů na jednotkový skok [28]

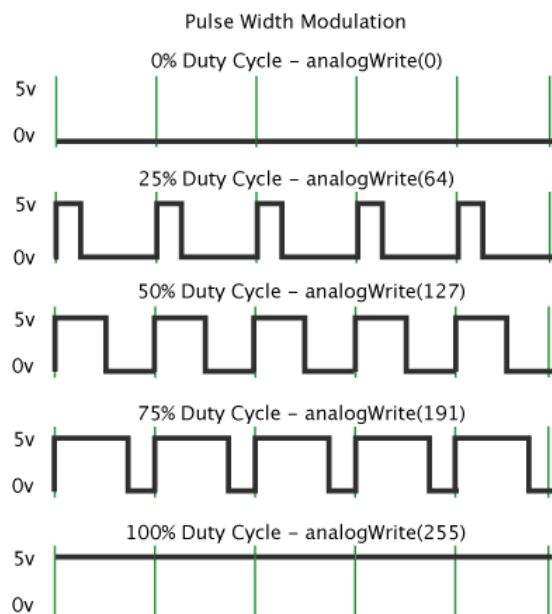
Jak je vidět, P regulátor pracuje s trvalou regulační odchylkou. PD také, ovšem rychlost jeho reakce je největší. PI má pomalejší náběh, zato však odstraňuje trvalou regulační odchylku. Kompletní PID regulátor obsahuje kompromis ze všech zmíněných výhod. Tato regulace je pro použití v pájecí peci naprosto vyhovující. Reaguje rychle na změny, odstraňuje regulační odchylku a při správném nastavení nekmitá kolem žádané hodnoty jako dvoupolohová regulace. [28; 24; 29]

## 2.4 Řízení topných prvků

Způsob řízení výkonu topných těles se přizpůsobuje zejména typu a způsobu napájení tělesa. V nejjednodušším případě lze spínacím prvkem přepínat mezi stavy vypnuto a zapnuto na plný výkon. Spínacím prvkem může být tranzistor, tyristor, triak i relé. Tranzistor je vhodný pro nižší napětí se stejnosměrným proudem. Tyristor lze použít s výhodou pro pulsující stejnosměrný proud a triak pro střídavý průběh. Relé je vhodné pro stejnosměrný i střídavý průběh, ovšem nese s sebou základní nevýhody v omezené životnosti a počtu cyklů. Zmíněné řízení topného prvku nám však neumožňuje provoz s plynulou změnou výkonu. Omezuje tak typ regulace pouze na dvoupolohový regulátor a mezi hlavní nevýhody takové soustavy patří neustálé kmitání okolo žádané veličiny. V následujících kapitolách jsou popsány pokročilejší způsoby řízení topných těles i s teoretickým rozбором vhodných spínacích prvků a situací, ve kterých se takové řízení využívá. [22]

### 2.4.1 PWM

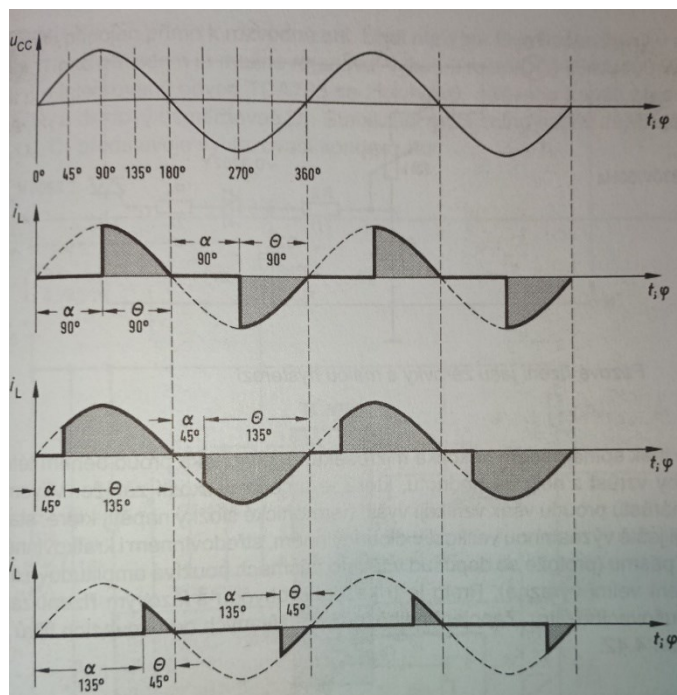
Pulzně šířková modulace je signál hojně používaný pro řízení výkonu stejnosměrných nízkonapěťových spotřebičů a pro jednoduchý a méně přesný přenos analogové informace. Lze také použít pro převod digitálního čísla na analogové. Hlavním parametrem PWM signálu je jeho střída a perioda. Střída je poměr mezi dobou logické jedničky a dobou logické nuly v periodě. Perioda nám pak udává, po jaké době se překlápění mezi logickými stavy opakuje. Některé hodnoty střídy a tomu odpovídající průběhy jsou na obrázku 17. Při užití PWM jako signálu řídicího výkon do spotřebiče je střída přímo úměrná průměrnému množství dodávaného výkonu. To znamená, že při střídě 50 % je průměrný dodávaný výkon roven polovině jmenovitého. Při řízení výkonu LED osvětlení pomocí PWM musí být frekvence signálu větší než setrvačnost lidského oka, aby se neprojevovalo rušivé blikání. U řízení otáček malého DC motoru musí být frekvence tak velká, aby motorek netrpěl na rázy. Při řízení odporové zátěže může být frekvence nízká, protože topná tělesa mají obvykle velkou setrvačnost. Pro použití v pájecí peci je tento způsob regulace výkonu vhodný za předpokladu, že tělesa budou napájena stejnosměrným napětím. Vlivem ostrých náběhových hran však bude vždy docházet k určité tvorbě elektromagnetického rušení. [22]



Obrázek 17 - Příklad PWM o různé střídě [30]

### 2.4.2 Fázové řízení

U tohoto typu řízení je předpokládáno napájení střídavým nebo pulzujícím průběhem napětí. Fázové řízení je odvozeno od principu, kdy regulace výkonu je docílena změnou fáze otevření spínacího prvku. Vzhledem k povaze napájení je nejvhodnější zvolit jako spínací prvek tyristor nebo triak. Tyto součástky dokážou spínat obrovské výkony a jejich vypnutí se automaticky uskuteční při průchodu napětí nulou. Spínač je tak připraven na další sepnutí. Tyristor dokáže pracovat jen s jednou půlvlnou sinusové periody, a tak pokud je třeba pracovat s celým průběhem, je nutné použít dvou tyristorů. Stejnou funkci také zastane triak, ačkoli ten nebývá vyráběn pro tak velké proudy jako tyristor. Průběh fázového řízení je na obrázku 18, kde lze vidět, že různé úhly otevření mají vliv na dobu, po kterou je do zátěže přenášen výkon. Na triaku nebo tyristoru je pouze malý úbytek napětí, daný přídržným napětím, a tak lze výkon do zátěže plynule regulovat v celém rozsahu téměř bez ztrát. Nevýhodou tohoto způsobu řízení je fakt, že při spínání během půlperiody dochází k tvoření ostrých náběhových hran a tím k tvoření významného rušení a vyšších harmonických frekvencí, které je nutné na vstupu zařízení filtrovat, aby nedocházelo k ovlivňování ostatních zařízení připojených k síti. [22; 21]



Obrázek 18 - Fázové řízení [21]

### 2.4.3 Změna napájení

Pokud bude uvažováno topné těleso s odporovým charakterem a napájení stejnosměrným proudem, tak výkon na tomto tělese bude odpovídat výpočtu (5).

$$P = U * I, [W] \quad (5)$$

Pokud bude za proud dosazen výpočet proudu podle Ohmova zákona, bude nyní vztah vypadat následovně (6).

$$P = \frac{U^2}{R}, [W] \quad (6)$$

Jak je patrné, napětí je zde umocněno dvěma, a tak každá jeho změna bude mít významný vliv na výkon. Například pokud se napětí změní na polovinu, výsledný výkon bude čtvrtinový oproti původnímu. Pomocí změny napájecího napětí pro topné těleso lze tak efektivně měnit výkon tohoto tělesa. V době širokého využití spínaných měničů může mikroprocesor jednoduše měnit výstupní napětí měniče a tím regulovat tepelnou soustavu. Pokud pomíneme samotný spínaný zdroj, tak v obvodu nedochází k dalšímu spínání a tím je omezeno i rušivé elektromagnetické vyzařování. U většiny aplikací spínaného zdroje lze výstupní napětí měnit jen v určitém rozmezí, a tak například při požadavku na velmi malé výstupní napětí, a tím velmi malý výkon topného tělesa, se celý zdroj vypne a výstupní napětí klesne na nulu. Další možností je změna napájení pro topné těleso jen v určitých krocích, kdy má systém připravené například tři hodnoty napětí a dochází pouze k přepínání mezi nimi. Regulace tak není zcela spojitá a je pravděpodobné, že teplota v pájecí peci bude kmitat okolo žádané hodnoty, ovšem v menší míře než při dvupolohové regulaci. Celkově má tato

metoda jen velmi nepatrné výhody oproti ostatním, a tak se s ní není možné běžně setkat v konstrukci pájecí pece.

#### **2.4.4 Přepínání topných elementů**

Tento způsob řízení výkonu vychází z předpokladu, že máme topné těleso rozděleno na více částí. Například si lze představit topnou spirálu, která má po každých deseti centimetrech odporového drátu odbočku. Přepínáním napájení mezi odbočkami lze docílit změny dodávaného tepelného výkonu do systému. Realizace je ovšem náročná, neboť je potřeba zvolit kompromis mezi složitostí přepínacího obvodu a jemností nastavení tepelného výkonu. Čím jemnější bude nastavení, tím větší počet spínacích prvků je třeba použít. Vzhledem k tomu, že existují funkčně i ekonomicky výhodnější metody, tato metoda se příliš často nevyužívá. Je však nutné zmínit, že díky velmi nízké frekvenci přepínání tato metoda téměř absentuje jakýchkoliv elektromagnetických rušení.

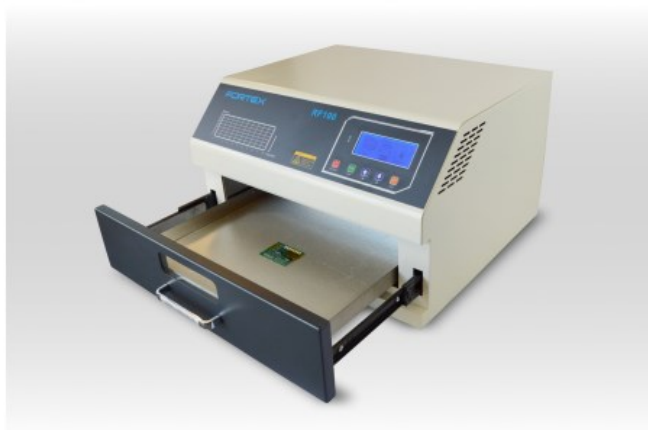
## 3 Konstrukce pájecích pecí

### 3.1 Komerčně dostupné možnosti

Při tvorbě stroje je vhodné vycházet z určitých předloh a zavedené praxe. Níže je proveden rozbor dvou zástupců dostupných pájecích pecí. Tato práce se zabývá zejména malými pájecími pecemi pro prototypovou a hobby výrobu. Pec pro sériovou výrobu je uvedena pro ucelení představy a stavu trhu.

#### 3.1.1 Fortex RF 100

Pájecí pec od výrobce Fortex. Podle popisu výrobce má snímání teploty několika termočlánky. Jako topné těleso je použit infrazářič a ovládací panel disponuje displejem a membránovými tlačítky. V rozsahu dodávky je software pro PC, pomocí kterého je možné nastavovat pohodlněji pájecí profily a další parametry pájecí pece. Izolační materiál se nazývá hliníkosilikátová bavlna. Zpracování pece je na obrázku 19.



Obrázek 19 - Menší prototypová pájecí pec [31]

Jak je vidět, DPS se vkládá do šuplíku a po zavření může začít proces přetavení. Maximální velikost DPS je stanovena výrobcem na 30 x 35 cm. Udávaný výkon topných těles je 2400 W. Zařízení váží 28 kilo a vnější rozměry 504x500x314 milimetrů dokazují, že se skutečně jedná spíše o menší stroj. Cena je přibližně 40 000 Kč bez DPH na českém trhu. Zařízení umí samo detekovat a ohlásit chybu termočládku nebo topného tělesa a na zadní stěně disponuje otvorem, kterým se vyfukuje horký vzduch během chlazení. Plášť zařízení je plechový. [31]

#### 3.1.2 Juki RS 600

Pájecí pece Juki řady RS jsou průběžné pece určené k zakomponování do výrobní linky středních a velkých sérií. Pec RS 600 je nejnižší z řady a disponuje šesti tepelnými zónami. Má nejrychlejší zahřátí na provozní teplotu, pouze 25 minut. Všechny pece řady RS je možné doplnit o aplikování dusíkové ochranné atmosféry. Tato průmyslová zařízení se již řídí přes ethernetové připojení nadřazeným řídicím systémem. Důležitým prvkem při použití dusíku je také volitelné čidlo zbytkového kyslíku v interním prostředí, které může sloužit

pro zvýšení kvality pájení. Obrázek 20 vyobrazuje zjednodušený pohled na stroj a rozmístění tepelných zón.



**Obrázek 20 - Průběžná průmyslová pájecí pec [32]**

Pájecí pec také obsahuje ventilátory a individuálně ovládaný horní a spodní ohřev. Při použití ochranné atmosféry má zakomponované vodní chlazení se separací kondenzátu. Jedná se o průmyslový stroj, a tudíž je cena závislá na odebraném množství, na konkrétním odběru a samozřejmě na schopnosti obchodníka vyjednávat. Lze ovšem předpokládat, že to budou řádově stovky tisíc korun. Hmotnost stroje se pohybuje okolo dvou tun a jeho rozměry jsou 4205x1320x1505 milimetrů. Vhodný je pouze do výrobních hal, a to i kvůli maximálnímu příkonu, který činí 24 kW během zahřívání. Při produkci se pak příkon pohybuje okolo 6,5 kW. Kvůli vysokému odebíranému výkonu musí být pec napájena z třífázové rozvodné sítě o mezifázovém napětí 400 V. [32]

### **3.2 Izolační materiál**

Izolační materiál je v kontextu pájecí pece důležitý pro tepelné oddělení zahřívané desky od okolního prostředí. Pokud je izolační materiál nekvalitní nebo nevhodně zvolený, může docházet k tomu, že teplota uvnitř pece nebude růst dostatečně rychle a nebude tedy dodržen předepsaný teplotní profil. Celé zařízení se může stát příliš horkým, což není vhodné z hlediska bezpečnosti, a topná tělesa by musela být předimenzována. Tím se zvyšují nároky na napájení a spotřebu. Naopak pokud je izolace příliš silná a účinná, problémem se stává kvalita regulace, neboť při překmitu teploty, byť o malé hodnoty, již nedojde v rozumném čase k poklesu na žádanou hodnotu vlivem ztrát. Tyto ztráty jsou totiž příliš malé. Dále celé zařízení značně nabývá na velikosti, protože účinnějších izolačních vlastností se nejjednodušeji dosahuje zesílením izolačního materiálu.

Při návrhu je proto potřeba zvolit rozumný kompromis. Při vhodně zvolených izolačních parametrech je zařízení dostatečně efektivní při zahřívání desky plošných spojů, není nebezpečné pro obsluhu a společně s kvalitní regulací co nejpřesněji dodržuje předepsaný teplotní profil. V následujících podkapitolách budou projednávány různé izolační materiály použitelné pro výrobu pájecí pece. Jsou zde popsány výhradně typy tepelných izolací splňujících svými vlastnostmi rozmezí použitelných teplot požadovaných při procesu pájení. To znamená rozmezí přibližně 0 až 350 °C. [11; 10; 9; 6]

### 3.2.1 Minerální vata

Minerální vata je hojně využívaný tepelně izolační materiál ve stavebnictví. Je nehořlavá a izoluje jak teplo, tak i zvukové vlny. Může být tvořena čedičovými vlákny nebo také skleněnými vlákny. Méně používané jsou dnes azbestová vlákna a vysokopevní struska. Výroba těchto vláken je metodou zvlákňování z taveniny. Roztavené materiály se tlačí přes zvlákňovací trysku do ofukované chladicí šachty. Takto vyrobená vlákna se vrství a zhutňují do výsledné podoby vaty, desek nebo jiných specifických tvarů. Míra zhutnění má vliv na hustotu výsledného materiálu i na konečnou tepelnou vodivost. Při velkém zhutnění má minerální vata velkou hustotu, tím i větší tepelnou vodivost, ale na druhou stranu také větší mechanickou odolnost. Běžně se lze setkat s měrnou tepelnou vodivostí v okolí  $0,04 \frac{W}{m \cdot K}$ , což je z pohledu izolace výborná hodnota. Kromě zmíněného použití ve stavebnictví je možné minerální vatu najít i u elektrotechnických zařízení a domácích spotřebičů. Příkladem může být lednice, elektrická trouba, plynové kotle, motorové prostory automobilů nebo izolace potrubí a zásobníků TUV. [33; 6]

### 3.2.2 Pěnové sklo

Pěnové sklo je materiál nejčastěji recyklovaný ze skleněného odpadu. Jedná se o skleněnou hmotu s obsahem velkého množství vzduchových bublinek uvnitř. Díky tomu se materiál stává skvělým tepelným izolantem, který zároveň snese relativně vysoké teploty. Významné využití nachází ve stavebnictví, kde se používá jako izolace částí namáhaných v tlaku. Lze jej použít v podobě drti jako sypkou izolační výplň nebo v podobě desek, které mají ještě lepší mechanické vlastnosti. Pro izolaci ve strojích a přístrojích lze s výhodou použít zmíněné desky, neboť svojí strukturou zlepšují pevnostní vlastnosti a je možné vynechat spojový materiál, který by skrz izolaci tvořil tepelné mosty. Pohled na pěnové sklo použité ve stavebnictví je na obrázku 21.



Obrázek 21 - Použití pěnového skla [34]

Na druhou stranu má pěnové sklo větší hustotu než některé konkurenční materiály, a tak zvyšuje celkovou hmotnost stroje a snižuje jeho možnost snadné přenositelnosti. Základní parametry pěnového skla jsou v tabulce 3. Jak lze vidět, materiál je zařazen v nehořlavé třídě, což je pro tepelnou izolaci vyšších teplot důležité. Má dvojnásobnou tepelnou vodivost oproti samotné vzduchové mezeře, ovšem mechanické vlastnosti pěnového skla tuto

nevýhodu kompenzují. Tento izolační materiál je také snadno opracovatelný a odolný vlhkosti i plísním. [34; 6]

**Tabulka 3 - Vlastnosti pěnového skla [34]**

Složení	100% sklo
Hustota	135–145 kg/m <sup>3</sup>
Tepelná vodivost	0,06 W/m <sup>2</sup> *K
Specifická tepelná kapacita	850 J/kg*K
Hořlavost	Třída A1
Průměrná pevnost v tlaku	0,89 N/mm <sup>2</sup>

### 3.2.3 Aerogel

Aerogel je speciální materiál, který drží několik světových rekordů. Například je to pevná látka s nejnižší hustotou, s nejnižší tepelnou vodivostí a s nejnižší dielektrickou konstantou. Tepelná vodivost je skutečně malá, může dosáhnout až na  $0,016 \frac{W}{m \cdot K}$ . Demonstrace tepelné vodivosti aerogelu je na obrázku 22.



**Obrázek 22 - Demonstrace izolačních vlastností aerogelu [35]**

Aerogel je tvořeno až 99,98 % vzduchu nebo jiného plynu. Nejčastěji se jedná o oxid křemičitý, který je ve formě gelu. Při zahřátí gelu nad kritickou úroveň a za vysokého tlaku se kapalina přemění na plyn a vytvoří se vysoce porézní struktura. Póry jsou ve většině případů velké v rozmezí 2 a 50 nm. Výsledný materiál ztrácí většinu mechanických vlastností a je tedy velmi křehký. Díky svým vynikajícím izolačním vlastnostem však nachází uplatnění v náročných aplikacích, kde je nutné co nejtenčí izolační vrstvou zajistit co nejlepší izolační vlastnosti. Cena aerogelu je v porovnání s ostatními materiály vyšší. Aerogel z oxidu křemičitého má namodralou barvu, ale lze vyrobit aerogel i z mnoha dalších materiálů. [35]

### 3.2.4 Šamotové desky

Tyto desky jsou nejčastěji využívány v kotlích a krbech na pevná paliva, a to zejména kvůli vysoké žárové odolnosti. Zároveň není problém s velkou hmotností desek, protože se kotlí

běžně nemanipuluje. To se však nedá říct o uvažovaném použití v malé pájecí peci, kde by vysoká hmotnost znamenala snížení možnosti snadného přenášení stroje. Šamotové desky mají sice vysokou odolnost žáru, ale nemají příliš dobré izolační vlastnosti. Dokáží do sebe akumulovat energii a tu následně sáláním předávat do okolí. Pro pájecí pece malých rozměrů se absolutně nehodí. [6]

### 3.2.5 Vzduchová mezera

Protože vzduch má součinitel tepelné vodivosti velmi malý, přibližně  $0,03 \frac{W}{m \cdot K}$ , je velmi dobrým tepelným izolantem. Ve skutečnosti vzduch jako hlavní izolační složku využívá většina izolačních materiálů. Je tedy logické uvažovat samostatnou vzduchovou mezeru jako jeden z možných tepelných izolantů. Z principu je velkou nevýhodou absence jakékoliv mechanické stability, a tak je potřeba navrhnout dodatečné mechanické řešení pro udržení konstantní a pevné vzduchové mezery. Obvykle se tak ale tvoří nežádoucí tepelné mosty, a tak je pro většinu aplikací rozumnější zvolit některý z pevných izolačních materiálů. I tak má ale vzduchová mezera své nenahraditelné zastoupení v praxi. Dokonce i u pájecích pecí je často využívána jako doplňková tepelná ochrana. Na podobném principu funguje i vakuová izolace. V té se teplo přenáší jen zářením a tepelnými mosty danými konstrukcí. [6]

### 3.2.6 Sendvičové materiály

Míněny jsou tepelně izolační materiály vzniklé vrstvením několika typů látek na sebe. Výsledná struktura má vlastnosti odpovídající druhu jejího složení a lze takto vytvořit materiál s parametry přesně vyhovujícími danému použití. Může se jednat o nároky na mechanickou pevnost, tvárnost, odolnost vysokým nebo extrémně nízkým teplotám nebo požadavek na možnost vylisování konkrétního tvaru. Nejčastěji se spojují vrstvy kovových materiálů s minerální vatou nebo se vytvářejí vzduchové izolační kapsy mezi vrstvami tepelných štítů. Pro pájecí pece, kde není kladen žádný zvláštní požadavek na izolační materiál, se většinou nepoužívají. [6]

## 3.3 Ovládací panel a ovládání

Při ovládání pájecí pece je pro obsluhu mimo zapnutí a vypnutí přístroje důležitá zejména možnost nastavení parametrů teplotního profilu. Jak již bylo zmíněno, různé pájecí pasty mají různý optimální teplotní profil, a je proto potřeba mít možnost ho nastavit. Dále je vhodné, aby obsluha mohla kontrolovat průběh pájecího procesu, ať už zobrazovaným grafem nebo zobrazením aktuální teploty. Z doplňkových funkcí je vhodné, aby bylo možné změnit parametry regulátoru, zapnout nebo vypnout zvukovou signalizaci, nastavit korekci snímačů teploty nebo obnovit tovární nastavení. Při poruše nebo špatné funkci se hodí mít k dispozici diagnostické funkce a nezávislé testy jednotlivých prvků. Některé pájecí pece mají i komunikační rozhraní k připojení k počítači. Lze tak snadno nahrát požadovaný teplotní profil, spustit nebo zastavit proces a monitorovat správnou funkci.

## 3.4 Vnější plášť

### 3.4.1 Požadavky

Vnější plášť zařízení by v první řadě měl znemožnit dotyk člověka živých částí uvnitř stroje. Tohoto požadavku lze dosáhnout použitím velmi malých nebo žádných otvorů. Dále je třeba kryt, pokud je vyroben z kovu, řádně a kvalitně uzemnit. Mohlo by totiž dojít k uvolnění živého vodiče uvnitř stroje, a v takovém případě se nesmí za žádných okolností na krytu objevit životu nebezpečné napětí. Pokud je kryt uzemněn, vybaví proudový chránič nebo nadproudová ochrana, nejčastěji v podobě jističe. Kryt zařízení by měl také chránit vnitřní části proti vnějším vlivům. V neposlední řadě je důležitá i finální úprava v podobě barvy, tvaru či různých madel a ergonomie ovládacího panelu. Tyto aspekty velmi často ovlivňují kupujícího zařízení, neboť tvoří první dojem stroje.

### 3.4.2 Materiál

Běžné materiály na kryty strojů mohou být plasty, kovy nebo dřevo, případně různé kompozitní materiály. Pro použití v pájecích pecích budou uvažovány pouze plasty a kovy. Dřevo je pro tento typ tepelného stroje nevhodný. Plasty lze použít pouze za podmínky, že nepřijdou do styku s teplotou jejich měknutí. Tato teplota může být podle druhu plastu relativně nízká, i kolem osmdesáti stupňů celsia. Proto musí být veškeré tepelné části kvalitně z izolovány. Výhody plastových materiálů spočívají v nízké ceně a snadné tvarovatelnosti i velmi složitých a členitých částí. Jsou také lehčí než kovy a jsou nevodivé, takže je teoreticky možné vytvořit zařízení v druhé třídě ochrany.

Naproti tomu kov je pevnější a houževnatější. Kovové materiály snesou i zvýšenou teplotu, ovšem obsluha na to musí být upozorněna výstražnou cedulkou, aby nedošlo k popálení. Jelikož je kov vodivý, zařízení jsou konstruována výhradně v první třídě ochrany. Z plechu lze vyrábět zejména rovinné plochy, a to často z jednoho kusu metodou řezání laserem a ohýbání vyřezané geometrické sítě. Obecně pro pájecí pece je vhodnější kov, protože se zde vyskytují vysoké teploty a velké rovinné plochy. Dále má cena kovu na výslednou cenu celého zařízení jen malý vliv.

### 3.4.3 IP krytí

Stupeň krytí označovaný IP<sub>x</sub>y, kde za x je dosazeno číslo v rozmezí 0 až 6, které označuje ochranu proti vniknutí pevných částí. Druhé číslo, dosazeno za y, označuje stupeň ochrany proti vniknutí kapalin v kategoriích 0 až 9. Veškeré informace o třídách a zkouškách jsou v normě ČSN EN 60529. V tabulce 4 jsou vypsány významy číslic u značení.

Tabulka 4 - Třídy IP [36]

Stupně ochrany před dotykem nebezpečných částí a před vniknutím cizích pevných těles	
IP 0x	Nechráněno
IP 1x	Tělesa >50 mm a dotyk hřbetem ruky
IP 2x	Tělesa >12,5 mm a dotyk prstem
IP 3x	Tělesa >2,5 mm a dotyk nástrojem
IP 4x	Tělesa >1 mm a dotyk drátem
IP 5x	Chráněno před prachem a dotykem drátem

IP 6x	Prachotěsné a dotyk drátem
Stupně ochrany proti vniknutí vody	
IP x0	Nechráněno
IP x1	Svisle kapající
IP x2	Kapající ve sklonu 15°
IP x3	Kropení, déšť
IP x4	Stříkající
IP x5	Tryskající
IP x6	Intenzivně tryskající
IP x7	Dočasné ponoření
IP x8	Trvalé ponoření
IP x9	Tryskající vysokotlaká horká voda

Testování provádějí odborné laboratoře, které jsou vybaveny potřebným zařízením. Mají různé zdroje stříkající a kapající vody i bazény, ve kterých se testuje odolnost při ponoření. [36]

### 3.5 Napájení

Pro napájení pájecích pecí se nejčastěji využívá jednofázové síťové napětí 230 V. Uvnitř přístroje se toto napětí snižuje na hodnoty jednotek až desítek voltů pro potřeby napájení řídicí elektroniky, displeje, senzorů a dalších částí. Pro napájení topných těles se může využívat přímo spínané síťové napětí, což je výhodné z hlediska absence velmi výkonného snižujícího měniče nebo transformátoru. Na topná tělesa se však dostává nebezpečné napětí s potenciálem vůči zemi, a tak je pro méně výkonné a hobby stroje zvoleno napájení nízkým napětím odděleným od sítě. U průmyslových strojů se lze často setkat s připojením do třífázové zásuvky s mezifázovým napětím 400 V. Toho je využito z důvodu velkých výkonových odběrů.

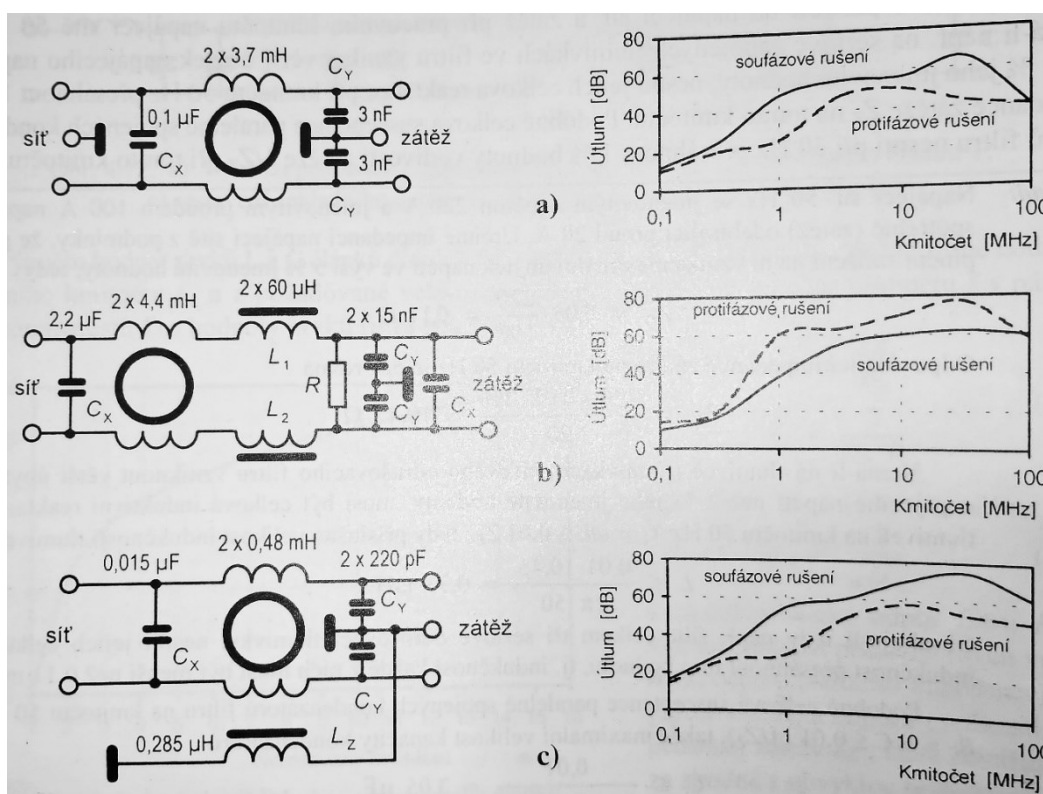
### 3.6 EMC

Elektromagnetická kompatibilita je vědní obor, který se zabývá schopností existence elektrotechnických zařízení. V knize Elektromagnetická kompatibilita od prof. Ing. Jiřího Svačiny, CSc. autor píše: „EMC je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.“ [37, s. 1] Pro potřeby EMC se zavádí pojem kvalita elektrické energie. Ta je ovlivňována jak výrobou, tak i přenosem a spotřebou energie a za kvalitní se dá považovat taková, která má dodržena jmenovitá napětí, jmenovitou frekvenci, sinusový průběh napětí a proudu a jejich nulový fázový posuv. V třífázové soustavě je nutná i souměrnost a vyváženost jednotlivých fází mezi sebou.

V napájecí soustavě tak rozeznáváme několik poruch. Mezi ty základní patří přepětí a podpětí. Dále je to harmonické zkreslení, kolísání frekvence a různé transienční jevy.

Elektrotechnické zařízení, které má dlouho a spolehlivě fungovat musí odolávat širokému spektru druhů rušení. Ať už se jedná o přírodní, či umělé zdroje, mohou být impulzního charakteru, spojitě, širokopásmové i úzkopásmové. Šíření rušení se děje elektromagnetickým vyzařováním, šířením po vedení a různými typy vazeb a interferencí. Vazba může být induktivní, kapacitní a galvanická. Odolnost zařízení proti rušení se dělí na dva typy, a to interní a externí. Interní odolnost označuje schopnost odolávat rušení vznikajícímu uvnitř samotného přístroje. Naproti tomu externí odolnost znamená schopnost odolat rušení přicházejícího z vnějšího prostředí, ať už po vedení nebo vzduchem. Docílit vysoké odolnosti lze konstrukčními kroky a ochrannými obvody, jak je popsáno na konci této kapitoly. Schopnost zařízení odolávat okolnímu a svému rušení je jen polovina řešeného problému.

Zařízení, zvláště ta zahrnující napájení spínaným měničem, mohou rušit své okolí, a to hned několika způsoby. Prvním z nich je rušení přes zpětné vyzařování do sítě, kdy spínaný zdroj nebo jiné obvodové prvky spínají velké výkony s velkou frekvencí. Při spínání se generují parazitní složky napětí, které jsou zejména impulzního charakteru. Toto rušení pronikající do napájecí sítě může ovlivňovat a v krajních případech i vyřadit z provozu ostatní zařízení a pro omezení takového děje se na vstup osazují vstupní síťové filtry. Ty mohou mít takovou konstrukci, že zamezí jak pronikání rušení ven ze zařízení, tak i pronikání rušení ze sítě dovnitř. Několik základních používaných vstupních filtrů a jejich útlumové charakteristiky jsou na obrázku 23 níže.



Obrázek 23 - Základní EMC filtry [37]

Dalším způsobem, jakým může zařízení elektromagneticky rušit své okolí, je vyzařování do zátěže. To vzniká zejména nedokonalostí obvodových částí spínaného zdroje, jako je rozptylová indukčnost, nenulový odpor vodičů a rozmístění součástek a blokovacích kondenzátorů. Toto rušení může ovlivňovat činnost samotného napájecího zařízení. Obvodové prvky pracují v takovém případě jako elektromagnetické anténní zářiče a rušení se šíří do okolí, kde také může ovlivňovat funkci ostatních zařízení. Zamezení vyzařování rušivého pole se provádí stíněním, omezením proudových smyček a správným konstrukčním návrhem.

Velkým pomocníkem v potlačování rušení je zmíněné stínění. To může plnit i funkci mechanickou nebo také může zajišťovat ochranu proti dotyku a proti vniknutí vlhkosti a prachu. Kvalitním stíněním lze dosáhnout útlumu až 100 dB, ovšem veškeré netěsnosti ve stínění výrazně snižují jeho efektivitu. Je nutné všechny průchodky a spoje navrhovat tak, aby bylo stínění dokonale těsné.

Dalším důležitým aspektem v řešení problematiky EMC je způsob zemnění. V principu existují dva typy, jednobodové a vícebodové zemnění. U jednobodového zemnění je snazší realizace a zamezuje se vzájemné ovlivňování jednotlivých obvodů přes zemní smyčky. U vyšších frekvencí se však začne projevovat větší délka zemnicích vodičů a ty začnou působit svojí vyšší impedancí. Chovají se také jako antény, a tak se pro vysokofrekvenční techniku výhradně využívá vícebodové zemnění. To, na rozdíl od jednobodového zemnění, nemá všechny zemnicí vodiče svedeny do jednoho bodu, ale každý dílčí obvod má svůj zemnicí vodič nejkratší cestou spojen na společnou zemní plochu nebo vodivý kryt přístroje. Tento způsob je nejvhodnější pro vysokofrekvenční číslicové obvody. Naproti tomu analogové obvody se v takovém případě stávají náchylnějšími na takto vzniklé proudové smyčky.

Omezení tvorby rušení a zvýšení vlastní odolnosti se také provádí doplňováním obvodů ochrannými a kompenzačními dílčími částmi. Mezi ně se řadí obvody pro omezení nárazových proudů, ochrany proti přepětí a podpětí. Například kvalitní přepětíová ochrana se skládá ze tří stupňů. Jako první je jiskřiště, následuje varistor a pro rychlé děje je nakonec zařazen transil. Důležité jsou také obvody zamezující výpadkům napájení. Pro omezení rušení galvanickou vazbou se zpravidla používají neutralizační transformátory a feritové kroužky. Kapacitní vazba se omezuje stíněním vodičů, navrhováním co nejkratších vzdáleností, zajištěním velké vzdálenosti mezi vodiči a omezením rychlosti dějů v obvodu. Induktivní vazba se omezuje podobně jako kapacitní a k tomu je třeba při návrhu omezovat velikost proudové smyčky na minimum. Při dodržení všech návrhových zásad a prvků obvodu je velká pravděpodobnost, že zařízení splní požadavky na EMC a bude dlouho a spolehlivě fungovat i za neustále se měnících podmínek moderního světa a s ním souvisejícího elektromagnetického smogu. [1; 37; 38; 39]

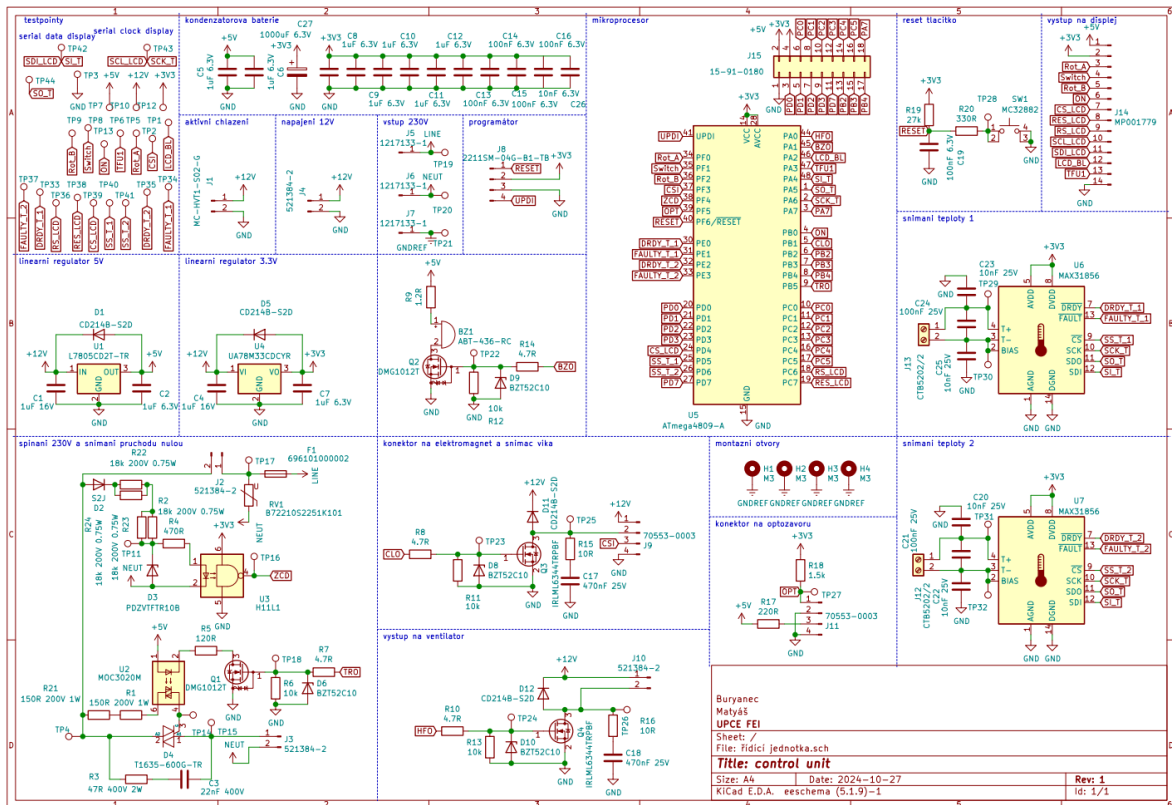
## 4 Realizace HW

### 4.1 Konceptce

Po zhodnocení poznatků nabitých v teoretické části bylo rozhodnuto, že konstrukce pece bude realizována jako pec s horním vkládáním vsázky neboli DPS. Celý horní díl bude na pantech vyklápěcí. V komoře bude v horní části rošt na DPS. Pod ním se bude nacházet rozháněcí ventilátor a topný článek. Za izolací komory bude v podélném směru umístěn řídicí obvod a motor ventilátoru. V horní části vedle víka se bude nacházet ovládací panel skládající se z LCD displeje, rotačního enkodéru a červené LED. Napájení pece bude pomocí jednofázového síťového napětí 230 V s tím, že toto nezměněné napětí bude napájet i topný článek. Pro vnitřní elektroniku zde bude umístěn spínaný zdroj 12 V.

### 4.2 Řídicí jednotka

Obvod řídicí jednotky se skládá z několika bloků. Celkové schéma je na obrázku 24. Hlavním prvkem je mikroprocesor, který zajišťuje chod celé pájecí pece. Jsou zde také bloky zajišťující napájení, zpracování vnějších signálů či spínání vnějších prvků.



Obrázek 24 - Kompletní schéma řídicí jednotky

#### 4.2.1 Mikroprocesor

Výběr mikroprocesoru je velmi složitá disciplína, při které je třeba zít v úvahu nepřeborné množství parametrů a vybrat správný typ pro danou aplikaci. Mezi hlavní parametry, které umožňují porovnání tisíců mikroprocesorů mezi sebou, patří výrobce, počet pinů, paměť,

způsob nahrávání programu a cena. Obvykle konstruktér volí takové typy, se kterými již přišel alespoň okrajově do styku, a na které má potřebné vybavení pro nahrání programu. Následuje úvaha, kolik pinů je potřeba a jak velká paměť bude pravděpodobně postačovat na firmware. Při plánovaném nasazení do sériové výroby přichází do popředí cena součástky, neboť i korunové úspory se na statisícových sériích významně projeví. V případě návrhu prototypu pájecí pece není cena příliš důležitá, protože se v dohledné době plánuje zprovoznění pouze tří exemplářů.

V první řadě byly uvažovány produkty od výrobce Microchip, protože má jeden z nejlepších sortimentů mikroprocesorů pro jednoduché, jednoúčelové stroje. Dalším důležitým faktorem pro tento výběr se stává jednoduchost nahrání programu pomocí specializovaných nástrojů, které jsou snadno dostupné. Velikost paměti je vyžadována relativně vysoká na poměry levných osmibitových mikroprocesorů, protože používaný LCD displej nemá v sériovém komunikačním módu možnost vyčítání RAM paměti, a tak musí být v mikroprocesoru buffer o velikosti shodné s počtem pixelů na displeji. Pokud by měla pec obsahovat i jednoduché animace, zvyšuje se požadavek na paměť do řádů desítek kB. Nakonec byl vybrán z portfolia relativně moderní osmibitový mikroprocesor s označením ATmega4809. Výhodou je velmi podrobný a přehledný datasheet i příznivé programovací prostředí Atmel Studio 7. Zmíněný mikroprocesor má nejvyšší výbavu z dané série. Mezi parametry pamětí, kterými se může chlubit, patří 6 kB statické RAM na proměnné, 256 B non-volatilní EEPROM paměti na proměnné, které mají zůstat uchovány i po vypnutí napájení a 48 kB flash paměti na kód programu. Mezi důležité periferie, kterými ATmega4809 disponuje, patří čítač/časovač a obvod reálného času. Dále pak SPI sběrnice a pokročilé možnosti přerušování a nastavování chování obvodu.

I přes to, že mikroprocesor obsahuje také A/D převodník, či komparátory a reference, není ani jedna z těchto periférií v pájecí peci přímo využita, a tak zde nebudou rozepsány. Příjemné je, že hlavní časovací krystal i oscilátor pro obvod reálného času je uvnitř mikroprocesoru, a tak není třeba na DPS přidávat tyto součástky externě. Oba oscilátory je možné i softwarově kalibrovat v případě potřeby. Samozřejmostí jsou integrované hlídací obvody jako například hlídací pes a kontrola výpadku napájení. Mikroprocesor má ve vybraném pouzdře 48 pinů, což je podstatně více, než je v pájecí peci potřeba, ovšem výběr je vždy kompromisem. Velmi výhodné však je, že každý pin má individuálně zapínatelný pull up rezistor a možnost generování přerušování.

V tomto konkrétním použití je jednou z nejdůležitějších integrovaných periférií čítač/časovač. Stará se nejen o přesné časování programu, generování impulsů a měření frekvence, ale také o PWM výstup. Díky přerušování od čítače/časovače je možné pohodlně spouštět různé události v přesný čas, aniž by program čekal v nekonečné smyčce. Je tak docíleno velmi efektivního využívání výpočetního výkonu. Dalším významným prvkem je SPI sběrnice. Je to velmi odolná a spolehlivá plně duplexní sběrnice a pomocí ní se komunikuje s displejem a s převodníky termočlánků. Sběrnice je nastavena tak, že se vysílá či přijímá vždy osm bitů, data se vzorkují s náběžnou hranou hodinového signálu, přičemž hodinový signál je v klidu v horní logické úrovni. První se posílá MSB a vybírá periferie,

kteřá má komunikovat pomocí příslušného pinu s názvem slave select. Při aktivování spodní logické úrovně na SS pinu pozná příslušná periferie, že následující data budou patřit jí a případně zahájí vlastní vysílání dat v návaznosti na hodinový signál. Jak je tedy patrné, sběrnice je synchronní.

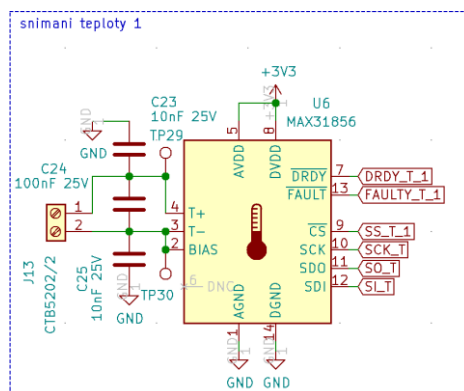
Tento mikroprocesor se programuje přes UPDI, což je pin výhradně použitelný pro programování a debugování mikroprocesoru. Jako nástroj nahrávání programu lze s výhodou použít univerzální zařízení s názvem PicKit 4 od výrobce Microchip. K tomuto nástroji je nutné připojit pouze tři piny a to GND, napájecí napětí a UPDI pin. Na programovacím konektoru osazeném na řídicí desce je přítomen ještě vývod pinu reset pro případ, že by bylo nutné mikroprocesor externě resetovat.

Jelikož byl tento mikroprocesor vybrán hlavně kvůli interním periferiím a velikosti paměti, zbylo po navržnutí zapojení určité množství volných nevyužitých pinů. Všechny tyto piny jsou vyvedeny na konektor, který lze využít při případném rozšíření funkcí v budoucnu nebo při úpravách. Na desce je také přítomno resetovací tlačítko, které je vhodné hlavně při debugování programu a pro běžnou obsluhu nebude snadno přístupné.

Veškeré informace o mikroprocesoru jsou přehledně popsány v příslušné literatuře. V tomto případě se jedná o datasheet [40].

#### 4.2.2 Snímání teploty

Pro snímání teploty pomocí termočlánků byl zvolen známý integrovaný obvod MAX31856 od výrobce Maxim Integrated, který je nyní součástí korporátu Analog Devices. Integrovaný obvod v sobě obsahuje veškeré důležité prvky pro měření teploty pomocí termočlánků. Má vlastní snímač teploty studeného spoje a také linearizační křivky pro základní typy termočlánků. Samozřejmostí je velmi přesný AD převodník o devatenácti bitech rozlišení. Obvod komunikuje přes SPI sběrnici s maximální frekvencí hodinového signálu 5 MHz. Součástí vnitřních registrů, přes které se nastavují parametry převodu, jsou i volitelné hranice spuštění alarmu. Při překročení teploty přes tuto hranici dojde k aktivaci dedikovaného FAULT pinu, pomocí kterého může mikroprocesor okamžitě na chybu reagovat. Součástí hlídání chyb je i detekce přerušeno termočlánku nebo příliš vysokého napětí na vstupu. Programově lze zapnout i filtr šumu o frekvenci 50 Hz, který vzniká na blízkých síťových rozvodech a zařizeniích. Obvod umí průměrovat měření a při připravených datech aktivuje pin DRDY, díky kterému může mikroprocesor okamžitě zahájit vyčítání právě změřeno teploty. Vzhledem k tomu, že má tento integrovaný obvod tolik výhod, je i jeho vyšší jednotková cena adekvátní. Zapojení, které je k vidění na obrázku 25, vychází z katalogového doporučeného schématu. Důležitá část je oddělení analogové a digitální země a napájení. V provedení PCB jsou napájecí trasy vedeny odděleně od digitálních obvodů. Tím se zajistí, že do snímače nepronikne rušení od digitálního spínání. Blokovací kondenzátory jsou samozřejmostí. Typ termočlánku lze vybrat v programu a do konstrukce byl vybrán typ J, protože má velkou citlivost, je dostupný a neobsahuje výraznou nelinearitu jako termočlánek typu K.



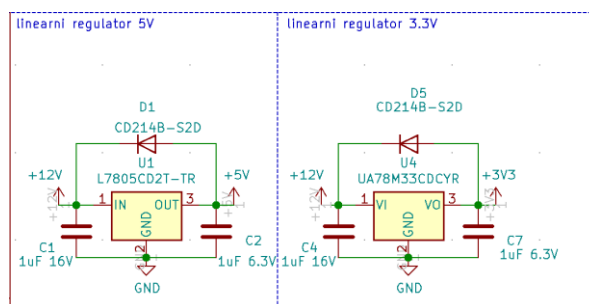
Obrázek 25 - Schéma zapojení snímání teploty

Na řídicí desce jsou připraveny dva identické a shodně zapojené obvody pro snímání teploty. Díky tomu se může přesněji měřit teplota a lze hlídat rovnoměrnost ohřevu. Při poruše jednoho z termočlánků je také možné dál provozovat zařízení pouze se zbývajícím snímáním, a tím se zvyšuje spolehlivost pece.

Zmíněná data o integrovaném obvodu MAX31856 jsou čerpány z datasheetu [41], kde lze také dohledat další důležité informace.

#### 4.2.3 Lineární regulátor napětí

Řídicí deska je napájena z externího zdroje 12 V stejnosměrných. Jelikož integrované obvody mají napájení nižším napětím, jsou zde přítomny regulátory napětí. Ty mají za úkol v první řadě snížit vstupní napětí na hodnoty 5 a 3,3 V. Zároveň také působí jako aktivní filtry a potlačují rušení, které by mohlo přicházet po napájecím vedení. Při kolísání napájení se výstupní napětí regulátoru téměř nemění. Koncept lineárních regulátorů pracuje s principem měření přebytečné energie na teplo. Výkonový prvek uvnitř regulátoru je nejčastěji tranzistor a mezi další bloky vnitřní struktury patří regulační a ochranné prvky. Lineární regulátory mají například ochranu proti tepelnému přetížení i proti vysokému proudu. Schéma zapojení je vidět na obrázku 26. Diody D1 a D5 plní ochrannou funkci v případě zkratu na vstupu a zamezují, aby přes regulátor tekla zpětný proud.

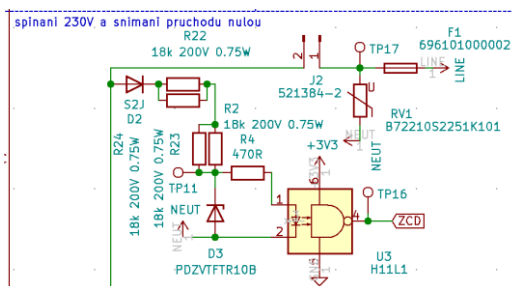


Obrázek 26 - Lineární regulátory

#### 4.2.4 Snímání průchodu nulou

Kvůli spínání triaku v momentě co nejmenšího aktuálního napětí musí obvodové řešení obsahovat detektor průchodu napětí nulou. Jeho realizace je na výstrižku schématu na obrázku 27. Hlavním prvkem je galvanicky oddělené hradlo s otevřeným kolektorem

na výstupu. Detektor hradla je vnitřně řešen svítivou diodou. Pro rozsvícení a zhasínání diody je ve schématu vidět obvodové řešení sestávající se z jednocestného usměrňovače a stabilizátoru se Zenerovou diodou. Při záporné půlčlenně na vstupu neprochází skrz usměrňovací diodu žádný proud, a tak nesvítí ani detektorová dioda. Naopak při kladné půlčlenně stabilizuje Zenerova dioda napětí na hodnotě přibližně 10 V a přes omezovací rezistor R4 prochází proud do detektorové diody. Ta svítí a přeneše signál opticky na hradlo. Průchod signálu nulou mikroprocesor detekuje každou náběžnou a sestupnou hranou pomocí generování přerušení.

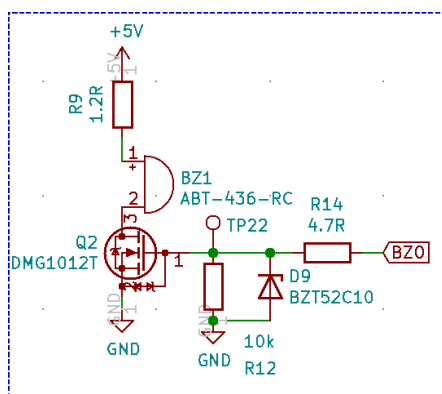


Obrázek 27 - Schéma snímání průchodu nulou

Díky galvanickému oddělení je zajištěna bezpečnost a spolehlivý provoz. Více o galvanickém oddělení je v literatuře [22; 21].

#### 4.2.5 Zvuková indikace

Pro hlavní komunikaci stroje s obsluhou je samozřejmě přítomen displej, ovšem při ovládání pomocí rotačního enkodéru je vhodná zpětná vazba od ovládacího prvku. Mimo přirozené taktilní odezvy byl začleněn do obvodu samo kmitající bzučák. Jeho zapojení je na obrázku 28 a pískání lze samozřejmě v programu vypnout. Bzučák je připojen na pin mikroprocesoru, který umožňuje generování frekvenčního výstupu, a tak je možné využít pasivní piezoměnič a pomocí různé frekvence měnit tón pískání.



Obrázek 28 - Schéma indikačního bzučáku

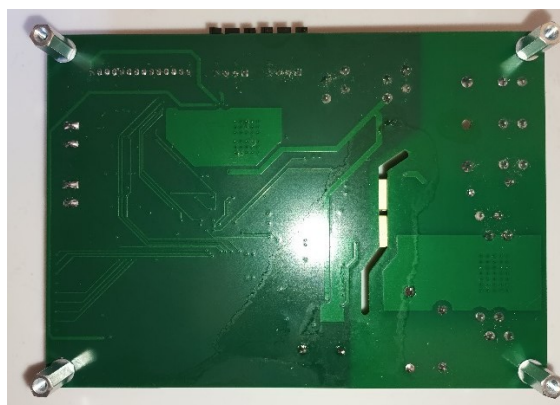
#### 4.2.6 Reálné provedení řídicí jednotky a DPS

Na obrázcích 29 a 30 je k vidění skutečná podoba obvodu řídicí jednotky probíraného v této kapitole. Velikost DPS je především určena umístěním konektorů. Část se síťovým napětím je kvalitně oddělena od nízkonapěťové části, což je důležité pro bezpečnost. Deska plošných

spojů je čtyřvrstvá a součástky jsou osazeny pouze z vrchní strany. Vnitřní vrstvy jsou určeny pro rozvod napájení, spodní vrstva obsahuje méně důležité signály a vrchní vrstva obsahuje důležité signály. Pro management tepla jsou v kritických místech umístěny propojky na spodní stranu desky, kde se o vyzáření tepla postará rozlité měď. Dalším důležitým krokem pro zajištění spolehlivosti obvodu je oddělení analogového a digitálního napájení. Od bloku lineárního regulátoru pro napětí 3,3 V je proto rozvedeno napětí a GND pro analogové obvody zvlášť. Napojení je realizováno nejkratší cestou, která se vyhýbá digitálním obvodům, k převodníkům termočlánku. Ty mají pro analogové napájení speciální vstupy, a i jejich mechanická konstrukce dodržuje toto oddělení. Mechanicky je DPS přidělena ke konstrukci pece pomocí distančních sloupků a montážní otvory jsou spojeny s ochranným vodičem síťového vstupu. Navrhnutá deska plošných spojů se nachází v příloze A této práce.



Obrázek 29 - DPS řídicí jednotky horní pohled



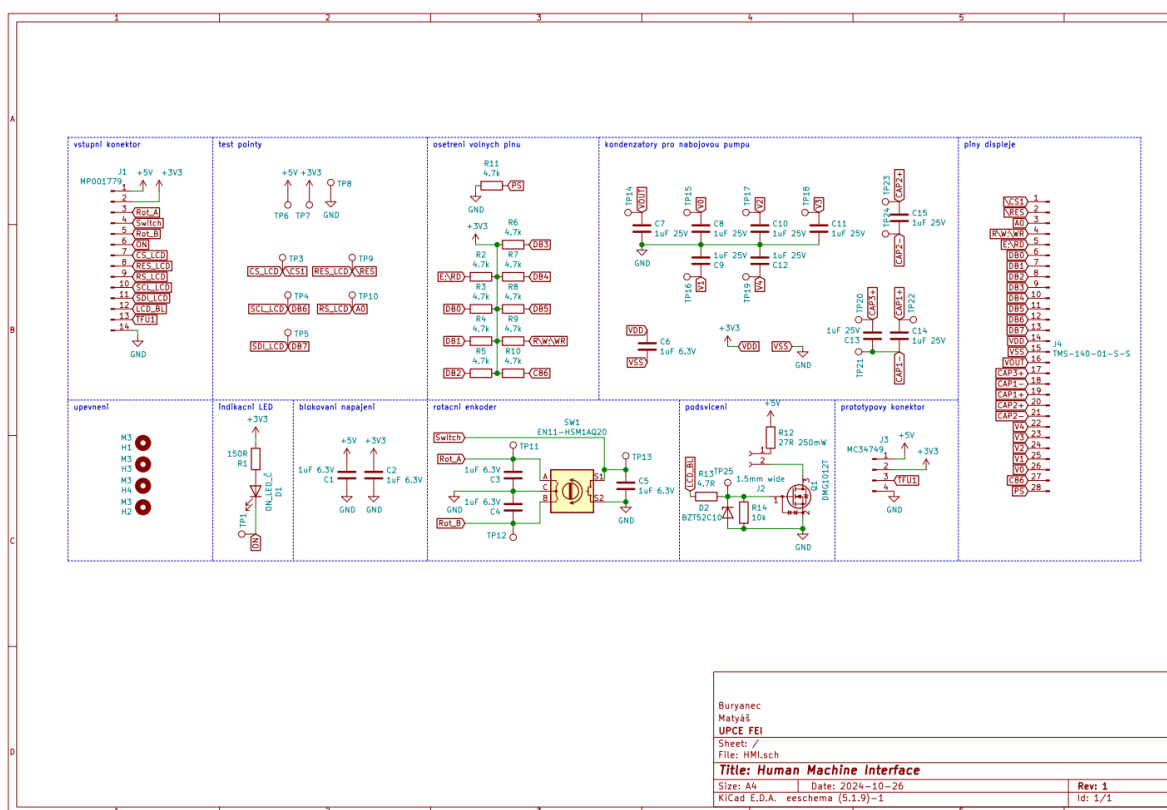
Obrázek 30 - DPS řídicí jednotky spodní pohled

### 4.3 Rozhraní člověk stroj

Hlavně se jedná o ovládací prvky a určitou formu komunikace stroje směrem k obsluze. Zde je pro indikaci a zobrazení použit displej. Díky HMI je možné stroj obsluhovat a kvalita provedení významně ovlivňuje uživatelský zážitek a konkurenceschopnost produktu na trhu. Ovládání musí být intuitivní, přesné a co nejjednodušší. Zobrazování by mělo být stručné,

ale ne nepřehledné. Je dobré se vyvarovat používání neintuitivních zkratk a nesrozumitelných kódů. Důležitým aspektem je i umožnění obsluze přizpůsobit si zobrazování nebo odezvu ovládacích prvků. Pro někoho je například příjemné, když je každý input doprovázen decentní zvukovou signalizací. Někdo preferuje podsvícený displej a někdo si podsvícení vypne. Pokud se dají všechny tyto parametry individuálně nastavovat, HMI vyhovuje větší skupině lidí.

V případě navrhované pájecí pece byly prvky umístěny na samostatnou DPS připojenou k řídicí jednotce pomocí plochého kabelu o čtrnácti vodičích opatřeného konektory. Kompletní schéma je k vidění na obrázku 31.

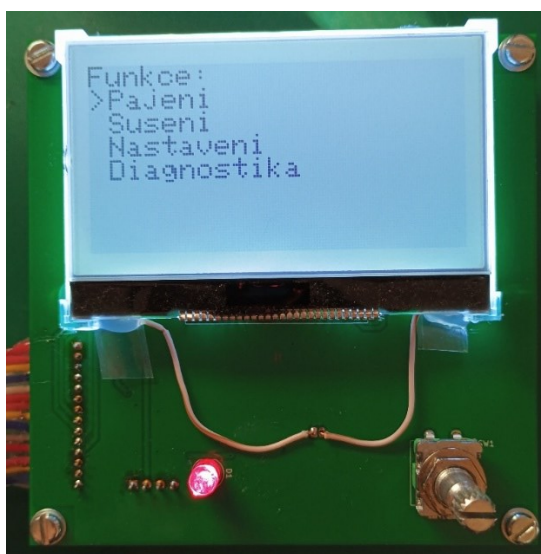


Obrázek 31 - Schéma rozhraní člověk stroj

### 4.3.1 Displej

Pro potřeby ovládání a nastavování pájecí pece byl zvolen grafický LCD displej. Na něm lze manipulovat s jednotlivými pixely, a tím je možné zobrazovat i jednoduchou grafiku. Pro pájecí pec to můžou být například grafy teplotních profilů a skutečného průběhu. Použitý displej má označení NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3 a používá řadič displeje ST7565R. Šířka je 128 pixelů a výška 64 pixelů, což je rozlišení pro pájecí pec naprosto dostatečné. Součástí displeje je i podsvícení pomocí bílé svítivé diody. Doporučené napájení je 3 V, ovšem 3,3 V, které jsou přítomny na desce a které jsou používány ostatními prvky obvodu, jsou v toleranci napájení displeje. Displej potřebuje ke své funkci externě připojenou baterii kondenzátorů, která slouží pro integrovaný napěťový měnič. Zmíněný řadič podporuje jak paralelní, tak i sériovou komunikaci a z důvodu menšího počtu propojovacích vodičů na

řídící desku byl zvolen sériový mód. Volba probíhá přivedením definovaných logických úrovní na příslušné piny. Mezi používané signály patří resetovací signál, signál výběru periferie a signál, který volí, jestli následující poslaný bajt bude datový nebo adresní. Na pinu DB6 je přiveden hodinový signál a na pin DB7 potom data vzorkované při náběžné hraně hodin. Datasheet [42] obsahuje tabulku příkazů a popisuje postup inicializace displeje. Pomocí adres a dat lze nastavit například kontrast, lze všechny pixely zapnout nebo je možné nastavit zrcadlové převrácení zobrazení. S použitím těchto informací bylo možné displej úspěšně obsluhovat k mikroprocesoru. Jedinou nevýhodou SPI propojení je nemožnost vyčítat data z interní RAM paměti displeje, a tak musí mikroprocesor obsahovat buffer, který neustále drží informaci o tom, co bylo naposledy na displej zobrazeno. Se zabudovaným řadičem displejového modulu je třeba při programování intenzivně pracovat. Jeho datasheet [43] obsahuje přehledně všechny informace a lze z něho odvodit i další funkce a vlastnosti LCD.

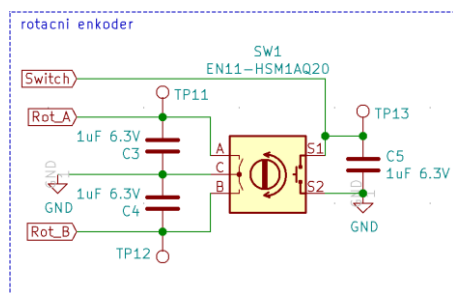


**Obrázek 32 - Foto provedení HMI**

Na obrázku 32 je k vidění spuštěný displej. Jeho podsvícení se spouští přes tranzistor a je možné ho v programu vypnout. Informace o tomto displeji jsou čerpány z katalogového listu [42].

#### **4.3.2 Ovládací prvky**

Pro ovládání pájecí pece je zvolena velmi známá varianta rotačního enkodéru se středovým tlačítkem. Pomocí enkodéru lze měnit hodnoty a pohybovat se v menu a pomocí tlačítka je možné potvrdit volbu. Tato kombinace ovládacích prvků je plně dostatečná pro pohodlné nastavování a ovládání zařízení. Realizace zapojení je na obrázku 33. Jsou zde vidět kondenzátory pro částečné odstranění zákmitů a samotný kombinovaný rotační enkodér.

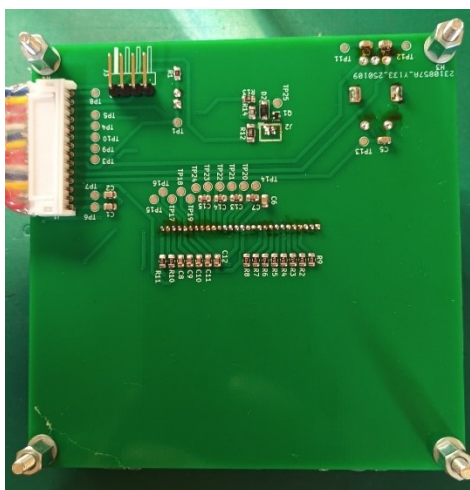


Obrázek 33 - Schéma zapojení rotačního enkodéru

Pullup rezistory má mikroprocesor integrovány interně, a proto zde nemusejí být. Čtení rotačního enkodéru probíhá tak, že mikroprocesor zaznamená přerušení náběžné hrany, například na pinu Rot\_A, a okamžitě se podívá na stav pinu Rot\_B. Podle toho, jestli je stav v logické 1 nebo 0, vyhodnotí otočení doprava nebo doleva. Na desce HMI je také integrovaná červená LED, která pomáhá indikaci stavu zařízení.

#### 4.3.3 Reálné provedení rozhraní člověk stroj a DPS

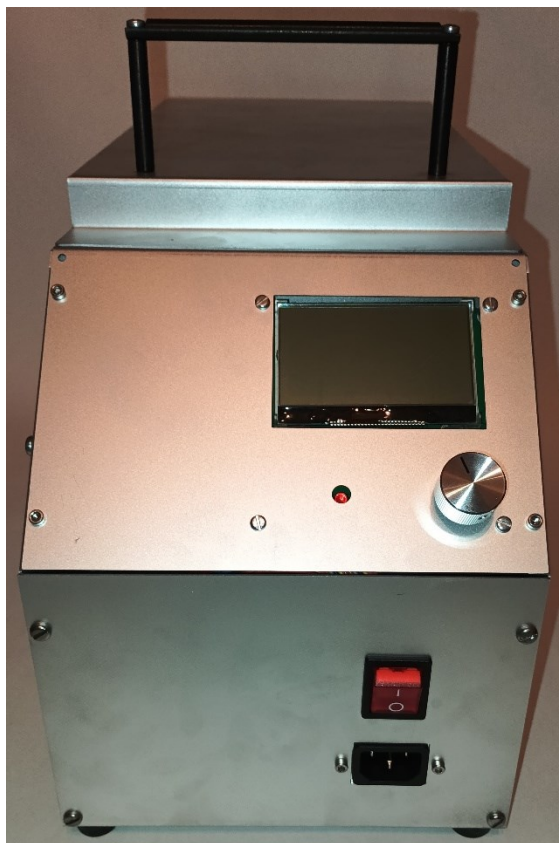
Na obrázku 34 je vidět připojený vstupní kabel do konektoru. Dále jsou zde součástky potřebné pro displej a spínání podsvícení. Hlavním úkolem DPS je však v tomto případě poskytovat displeji a ovládacímu prvku mechanickou pevnost.



Obrázek 34 - DPS rozhraní člověk stroj

Na desce DPS jsou také připraveny piny, kdy jeden pin je napojen na volný IO vývod mikroprocesoru a zbývající jsou napájeny s napětím 5 a 3,3 V a samozřejmě i společný potenciál GND. Díky této přípravě je možné při úpravách nebo dalších verzích pece přidat ovládací či signalizační prvek, aniž by se muselo zasahovat do stávající DPS.

Výsledná podoba HMI zakomponovaného do vnějšího obalu pájecí pece je na obrázku 35. Lze si povšimnout intuitivního rozmístění ovládacích prvků a esteticky vypadajícího ovládacího panelu. Ovládání rotačním enkodérem s tlačítkem je pro většinu uživatelů preferovaný způsob obsluhy takovýchto strojů. Výkres desky plošných spojů je v příloze B.



Obrázek 35 - Hotový ovládací panel

## 4.4 Topné těleso

V této kapitole bude proveden výpočet parametrů topného článku, jeho konstrukce a výsledné provedení. Ohřev pomocí předávání tepla prouděním a sáláním se nazývá nepřímý odporový ohřev. Zde konkrétně se stabilní vsázkou a normální atmosférou.

### 4.4.1 Výběr typu a výpočet

Vzhledem k parametrům a dostupnosti topných odporových materiálů byl vybrán pro výrobu topného tělesa Kanthal. Jeho rezistivita je  $135 * 10^{-8} \Omega m$ . Kanthal se velmi často používá pro výrobu topných článků kvůli jeho ceně, odolnosti a rezistivitě. Je to feritická slitina železa, chromu a hliníku. Žáruvzdorná vrstva se na jeho povrchu tvoří pomocí vrstvy  $Al_2O_3$ . [6, s. 97] Pro výpočet, nebo spíše odhad, parametrů topného článku je třeba v první řadě zjistit výkon potřebný k ohřátí desky se stanovenou strmostí nárůstu teploty. Začne se stanovením energie potřebné k ohřátí vnitřního prostředí pece a vsázky. Zde je nutné uvést zjednodušující podmínku. Bez ní by byl odhad obtížný, protože materiál a velikost ohřívané DPS se vždy liší. Bude tedy uvažováno, že vsázka je ocelový plech svými rozměry stejný jako dno pece a vysoký 1 mm. Toto zjednodušení snad poskytne dostatečnou aproximaci parametrů DPS, roštu, ventilátoru a nosné konstrukce topných drátů. Ocel má měrnou tepelnou kapacitu  $c_{ocel} 450 \frac{J}{kg * K}$ . Další látka přítomná ohřevu je vzduch. Bude uvažován objem vzduchu shodný s vnitřním objemem prázdné pece, protože rozdíl bude

minimální. Vzduch má tepelnou kapacitu  $c_{vzd} 1003 \frac{J}{kg \cdot K}$ . Pro výpočet hmotnosti vzduchu a oceli jsou použity obecně známé vztahy. Energie ohřevu  $W_o$  je vypočítána v (7) a vyšla 225 J.

$$W_o = \Delta\vartheta * (m_{vzd} * c_{vzd} + m_{ocel} * c_{ocel}), [J] \quad (7)$$

Kde  $m_{vzd}$  je hmotnost vzduchu uvnitř pece a  $m_{ocel}$  je hmotnost ocelového plechu. Nyní je možné spočítat výkon nutný k ohřevu definovanou strmostí. Vzhledem k tomu, že rovnice (7) je vztažena ke změně teploty  $\Delta\vartheta 1 K$ , bude i strmost vyjádřena v čase  $\tau$  nutném k nárůstu o 1 K. Z grafů teplotních profilů lze vyčíst maximální hodnotu  $\tau$  přibližně 0,33 s. Výkon ohřevu  $P_o$  je vypočítán v (8).

$$P_o = \frac{W_o}{\tau}, [W] \quad (8)$$

Příkon topného tělesa  $P_p$  je součtem výkonu ohřevu  $P_o$  a ztrátového výkonu izolace  $P_{z\ izol}$ . Dále se zavádí takzvaný bezpečnostní činitel [6, s. 108], který zajistí, aby vypočtené topné těleso nebylo poddimenzované. Uvažuje se kvůli vlivu stárnutí materiálů, poklesu napětí v síti a kvůli aproximacím ve výpočtu. V této práci je koeficient  $k_b$  uvažován 1,5. Nyní bude celkový příkon topného tělesa  $P_p$  roven 1143 W podle (9).

$$P_p = k_b * (P_o + P_{z\ izol}), [W] \quad (9)$$

Lze se přesunout k výpočtu parametrů odporového drátu. Topné těleso bude vinuto z odporového drátu kruhového průřezu. Je nutné zjistit průměr drátu a jeho délku. Jako první bude vyšetřováno maximální dovolené měrné povrchové zatížení  $p$  topného článku. Výpočet se skládá z povrchového zatížení sáláním  $p_s$  a prouděním  $p_p$ . Vedení se obvykle při konstrukci peci zanedbává. Zde je rovnice (10), která bude níže vysvětlena.

$$p = p_s + p_p = \psi * \varepsilon_{\text{cl}} * \sigma_{\text{c}} * \left[ \left( \frac{\theta_{\text{cl}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta}{100} \right)^4 \right] + \alpha * (\theta_{\text{cl}} - \theta), \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (10)$$

Význam veličin je následující.  $\psi$  je součinitel povrchového zatížení, který se zavádí kvůli tomu, že topné články v peci nesálají do volného prostoru. Odhaduje se podle zkušeností a má hodnotu mezi 0 a 1. Stupeň černosti článku je označen  $\varepsilon_{\text{cl}}$ . Teplota vnitřku pece je označena  $\theta$  a uvažuje se 623,15 K a  $\theta_{\text{cl}}$  je povrchová teplota článku uvažovaná 973,15 K. Součinitel přestupu tepla konvencí má pro přirozené proudění bez nucené cirkulace atmosféry hodnotu přibližně  $15 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  a označován je znakem  $\alpha$ . Pro nucený oběh atmosféry může být  $\alpha$  několiknásobně větší. Jelikož je ovšem možné ventilátor v pájecí peci vypnout, bude pro výpočet použita základní hodnota. Poslední veličina  $\sigma_{\text{c}}$  je součinitel sálání absolutně černého tělesa. Dovolené měrné povrchové zatížení  $p$  topného článku vyšlo v tomto případě  $24386 \frac{W}{m^2}$ . Nyní je možné spočítat průměr topného drátu převzatý z [6, s. 117]. Vzorec je uveden (11). Rezistivitu značí  $\rho$  a pro zvolený materiál odpovídá  $135 * 10^{-8} \Omega m$ .  $U$  je napětí napájení, v tomto případě 230 V efektivního střídavého průběhu.

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 * P_p^2 * \rho}{\pi^2 * p * U^2}}, [m] \quad (11)$$

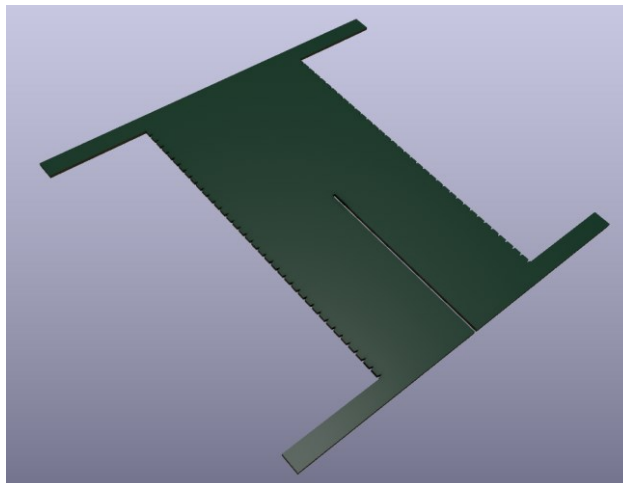
Průměr odporového drátu  $d$  vyšel 0,82 mm, přičemž nejbližší běžně dostupná hodnota je 0,8 mm. Nyní už zbývá jen zjistit délku vodiče, a to pomocí rovnice (12).

$$l = \frac{P_p}{\pi * d * p}, [m] \quad (12)$$

Potřebná délka  $l$  topného vodiče vyšla 18,6 m. Při provádění výpočtů bylo uvažováno několik zjednodušení jako třeba předpoklad, že tepelná vodivost je konstantní, že napětí je konstantní, nebo že jednotlivé parametry nejsou závislé na teplotě. Tato zjednodušení je možné zavést pro ulehčení výpočtu a přesnost celého výpočtu není kritická, protože byl stejně použit bezpečnostní koeficient  $k_b$ , který byl odhadnut. Výpočty jsou převzaty z knihy [6].

#### 4.4.2 Konstrukce

Topné těleso v peci bude konstruováno jako otevřený topný článek. Na otevřené články mohou působit negativní vlivy redukční či oxidační atmosféry nebo vodní páry a síra, což ovšem u pájení není třeba uvažovat. Také teploty pájení nejsou z pohledu jiných aplikací topných článků vysoké. Kvůli velikosti pece bude topný drát namotaný ve spirále na nosnou konstrukci zhotovenou ze slídových desek. Průměr spirály má obvod přibližně 40 cm a celková délka aktivní části topného tělesa je omezena na 18 cm. V předchozí kapitole byla spočítána potřebná délka topného vodiče a s použitím základních geometrických úvah vychází počet závitů spirály přibližně na 48 závitů. Pokud bude spirála rovnoměrně rozprostřena přes celou délku, budou jednotlivé závity od sebe přibližně 5 mm.



Obrázek 36 - Model nosné konstrukce topného tělesa

Na obrázku 36 je znázorněn model nosné konstrukce, který se následně vyhotoví na CNC stroji v počtu dvou kusů. V návrhu jsou vytvořeny zářezy pro umístění odporového vodiče. Výstupy na krajích zajistí dostatečnou vzdálenost od stěn pájecí komory a pomocí výřezu

uprostřed budou dva kusy do sebe spojeny tak, že vznikne kříž. Reálná podoba je pak na obrázku 37. Těleso je vyrobeno ze slídové desky v počtu dvou kusů, vyřezané na laseru. Tyto dvě desky se do sebe složí a vytvoří tak křížový základ pro navinutí topného drátu. Ten je vinut ve spirále za pomoci vyrobeného dřevěného kopyta. Celé topné těleso bude vloženo do pájecí komory a k zafixování do pozice se použijí dna L profily přišroubované ke spodní stěně. Přívodní vodiče jsou vedeny v žáruvzdorné ochranné bužírce ze skelných vláken a napojení je realizováno lisováním.



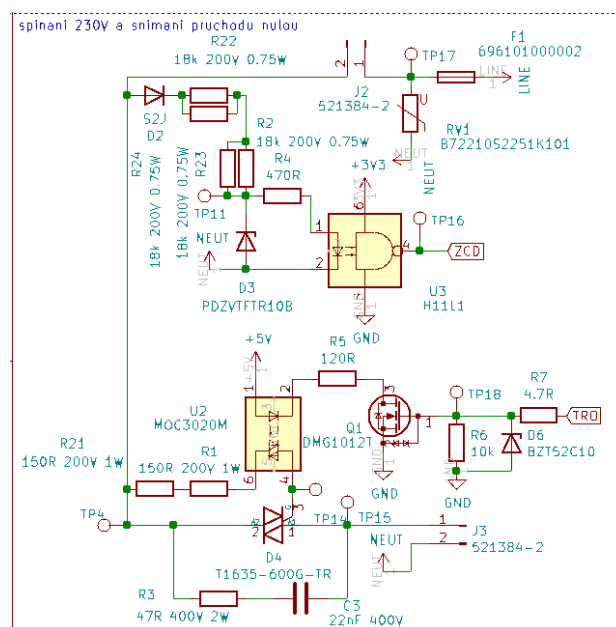
Obrázek 37 - Topné těleso

#### 4.4.3 Spínání topného tělesa

Z teoretické přípravy možností spínání odporové zátěže je patrné, že pro spínání střídavého průběhu síťového napětí 230 V je nejvhodnější triak. Dokáže na rozdíl od tyristoru sepnout v obou polaritách a vypne se při každém průchodu nulou. Maximální proudy do 16 ampér jsou naprosto běžné a maximální napětí na triaku může být nejčastěji 600 V. Pro zapínání triaku je nutný proudový impuls do řídicí elektrody a kvůli omezení rušení je vhodné ho spínat krátce po průchodu nulou. V opačném případě dochází k tvoření ostrých náběhových hran, a tím k zvýšenému vyzařování elektromagnetického rušení.

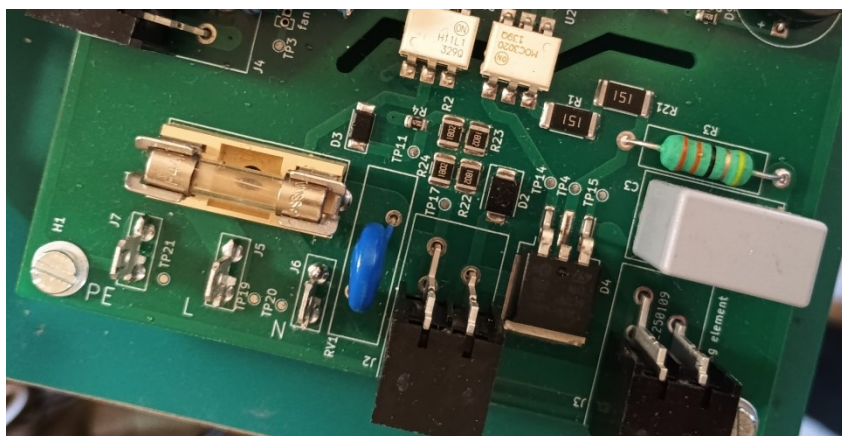
Regulace výkonu tak bude probíhat následovně. Při průchodu nulou se triak řídicím signálem sepne a bude se udržovat sepnutý definovaný počet půlvln sinusového průběhu. Poté se proud do řídicí elektrody přeruší a triak se nechá definovaný počet půlvln rozepnutý. Tento způsob řízení lze označit jako synchronizovaný PWM řídicí signál. Jelikož dochází ke spínání síťového napětí, je nutnost galvanicky oddělit citlivou nízkonapětovou elektroniku od výkonové části. V tomto návrhu je to řešeno optotriakem. Ten zajistí galvanické oddělení tím, že se spínací signál interně převádí na optický a detektorem se spíná malý triak. To vše v jednom pouzdře. Tímto malým optotriakem dochází ke generování proudových impulsů do hlavního triaku. Další důležitou částí návrhu je utlumovací článek. Je tvořen sériovou kombinací rezistoru a kondenzátoru, zde R3 a C3. Hodnoty součástek se odhadují podle zkušeností a případně upravují na základě měření. Utlumovací článek ochrání triak v případě tvoření napěťových špiček při vypnutí zátěže.

Při poruše, kvůli které dojde k přehřívání zařízení, zasáhne havarijní teplotní spínač připojený na konektor J2 na schématu na obrázku 38. Proto dojde k vypnutí topného tělesa, a jelikož je snímání průchodu nulou až za tímto ochranným prvkem, může mikroprocesor detekovat ztrátu signálu průchodu nulou a na základě této informace zastavit proces pájení a signalizovat chybu.



**Obrázek 38 - Schéma spínání topného tělesa**

Na schématu na obrázku 38 si lze v horní části povšimnout klasické tavné pojistky v kombinaci s varistorem. Varistor dokáže ochránit zařízení v případě přepětí v síti. Pokud by mělo přepětí tak velkou energii, že by došlo k proražení varistoru, zasáhne tavná pojistka a odstaví obvod od napájení. Tavná pojistka zároveň chrání před požárem či úrazem elektrickým proudem tím, že v případě zkratu vůči zemi například na topném článku bezpečně odpojí obvod. Jištění je blíže popsáno v [39]. Z hlediska bezpečnostních prvků i spouštění triaku je bezpečně odděleno od obvodových částí, které by mohly způsobit úraz elektrickým proudem. Pokud by se například dostalo vlivem poruchy síťové napětí do napájecí větve mikroprocesoru, je zde možnost, že by se ovládací prvky ocitly pod tímto napětím a obsluha by mohla přijít k úrazu. Tento stav je znemožněn galvanickým oddělením a správným návrhem DPS. Galvanicky oddělený triak s označením U2 teprve potom spíná hlavní triak D4. Galvanické oddělení je realizováno přenosem signálu fotocestou. Více o galvanickém oddělení je v literatuře [22; 21]. Na obrázku 39 je vidět fotografie DPS řídicí jednotky, kde si lze povšimnout detailu oddělení vysokého napětí od citlivých elektronických prvků.



Obrázek 39 - Foto galvanického oddělení části obvodu se síťovým napětím

## 4.5 Izolační materiál

V následujících kapitolách bude popsán návrh a výroba izolačního materiálu. Izolace pece je klíčová ke správné a ekonomické funkci.

### 4.5.1 Volba typu materiálu a velikosti

S ohledem na teoretickou rešerši izolačních materiálů byl vybrán izolační materiál struktury aerogelu. Důvody jsou následující. Aerogel má vynikající izolační vlastnosti a v kombinaci s dalšími prvky v kombinovaném izolačním materiálu je i relativně mechanicky odolný a dostupný. Strukturou připomíná filc. Mezi jeho parametry klíčové k následujícím výpočtům patří tepelná vodivost s hodnotou průměrně  $0,02 \frac{W}{m \cdot K}$ .

Velikost vnitřku pece je třeba určit na základě několika hledisek. Hlavně se musí do topné komory vejít naplocho největší uvažovaná deska plošných spojů i s dostatečným volným prostorem okolo, aby byla zajištěna cirkulace vzduchu i nad desku. V komoře musí být dostatek místa i na celé topné těleso a na lopatky ventilátoru, který bude rozhánět horký vzduch tak, aby byla zajištěna rovnoměrnost ohřevu. Jako největší uvažované DPS byla v tomto případě vybrána deska s velikostí stran 20 a 10 cm. Po připočítání 2,5 cm ke každé straně pro proudění vzduchu vychází vnitřní rozměr pece na 25 a 15 cm. Nyní je třeba stanovit výšku komory. Jelikož pro ventilátor, který bude umístěn ve spodní části pece, je třeba vyčlenit čtvercový průřez, bylo zvoleno, že výška ode dna pece k roštu na desky plošných spojů bude stejná jako šířka pece, tedy 15 cm. Výška součástek na desce může být až 3 cm, a tak po připočtení dvou centimetrů na tloušťku roštu, DPS a mezery pro proudění vzduchu vychází celková výška komory na 20 cm. Pro další výpočty se bude hodit znát obsah plochy vnitřních stěn komory a objem komory. Plocha izolace  $S_{izol}$  vychází  $0,235 m^2$  a objem komory  $V_{kom}$  je  $0,0075 m^3$ .

### 4.5.2 Výpočet ztrátového výkonu

Ztrátový výkon izolace komory je důležitý pro návrh topného tělesa. Nejdřív ze všeho je třeba vypočítat množství tepla, které projde izolací z vnitřku pece ven. K tomu poslouží základní vzorec níže (13).

$$Q = \lambda * S_{izol} * \tau * \frac{\Delta T}{d}, [J] \quad (13)$$

Kde Q je počítané teplo,  $\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti,  $S_{izol}$  odpovídá vnitřní ploše izolace, což znamená obsah plochy kvádrů vypočítaný v předešlé kapitole.  $\Delta T$  znázorňuje rozdíl teplot uvnitř a vně pece,  $d$  odpovídá tloušťce izolace a  $\tau$  značí čas. Pokud tuto rovnici vydělíme na obou stranách  $\tau$ , dostaneme výpočet (14) ztrátového výkonu izolace  $P_{z\ izol}$ .

$$P_{z\ izol} = \lambda * S_{izol} * \frac{\Delta T}{d}, [W] \quad (14)$$

Pokud za  $\Delta T$  budeme uvažovat nejhorší scénář, kdy uvnitř pece je 350 °C a vně je 10 °C, a dále za tloušťku izolace dosadíme 0,02 m, vyjde ztrátový výkon  $P_{z\ izol}$  79,9 W. Výpočty jsou převzaty z knihy [6] doplněné o obecně známé formule. [10; 9; 11; 6]

#### 4.5.3 Konečná podoba

Vnitřní komora má v sobě obsažené veškeré důležité části, jako je topné těleso, termočlánky, mřížka a ventilátor. Je tvořena lisovanou krabicí bez horní stěny a se šroubovanými boky. Kvůli teplotním rozdílům je celá sestava vnitřní komory pájecí pece vyrobena z nerezového plechu o tloušťce 3 mm. Nerezový plech při zahřívání nemění složení vnitřní atmosféry, a tak neohrozí pájecí proces. Tepelná izolace z materiálu kombinujícího aerogel a vlákna se nachází okolo vnitřní komory i ve víku pece. Jak již bylo předestřeno v předchozích kapitolách, tloušťka izolace je 2 cm, což zajišťuje dostatečnou tepelnou ochranu. Vnější plášť by se tak neměl moc zahřívát a pec by měla být schopna dostatečně kvalitně následovat pájecí profil.

Níže je obrázek 40, na kterém je vyfocena izolace a komora pájecí pece. Izolace má tloušťku 2 cm, stejně jako se uvažovalo v předchozích výpočtech. Na krajích je izolace odhalená, čehož se využívá při uzavření pece, protože víko doléhá přímo na izolaci a tím je zajištěna těsnost a kvalita izolace jako celku. Jediné narušení izolace je v místech montážních úchytů komory, průchodu hřídele ventilátoru a vedení kabeláže.



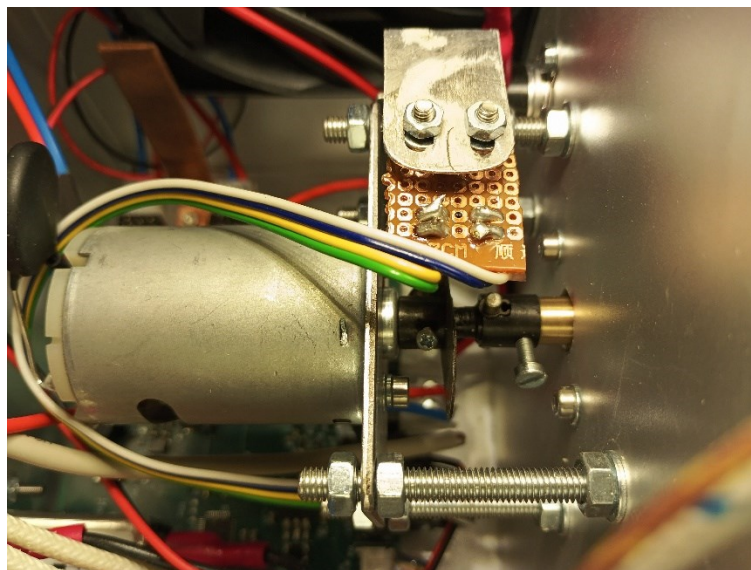
Obrázek 40 - Realizovaná pájecí komora

## 4.6 Ventilátor

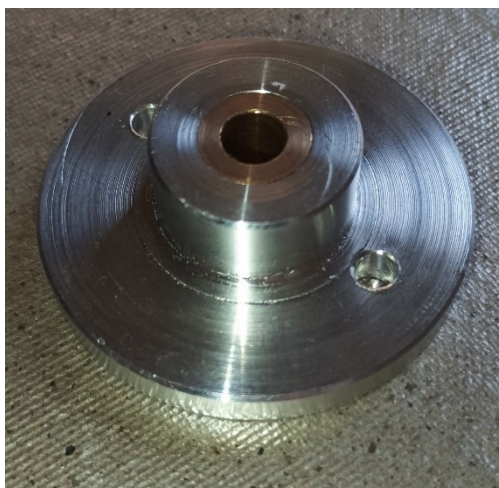
Pro docílení co největší rovnoměrnosti ohřevu je do prostoru pece vsazen ventilátor. Ten zajišťuje cirkulaci atmosféry a zároveň tím urychluje ohřev, protože zvyšuje přestup tepla prouděním. Dle [6, s. 105] je použití ventilátoru jedním ze základních kroků k docílení kvalitního a přesného ohřevu. Kvůli potlačení překmitů se někdy realizují větrací klapky, které přebytečné teplo odvedou do okolního prostředí. U konstrukce pece na DPS toho zde není využito. Místo toho je izolace napočítaná tak, aby se případné přebytečné teplo při překmitu odvedlo do okolí v rozumném čase přes ní.

### 4.6.1 Konstrukce ventilátoru

Jelikož by motor ventilátoru nevydržel prostředí uvnitř pece, je umístěn vně izolaci a do komory je zavedena prodloužená hřídel z nerezové oceli. Lopatky ventilátoru jsou orientovány tak, aby ofukovaly topný článek, jak lze vidět na obrázku 40. Spojka elektromotoru a hřídele zároveň pracuje jako generátor zpětnovazebního signálu. Realizace je vidět na obrázku s číslem 41. Pro uložení hřídele v pájecí komoře bylo navrženo kluzné ložisko, které bylo vyhotoveno na soustruhu. Skládá se z hliníkové příruby a mosazné vložky. Jeho podoba je na obrázku 42.

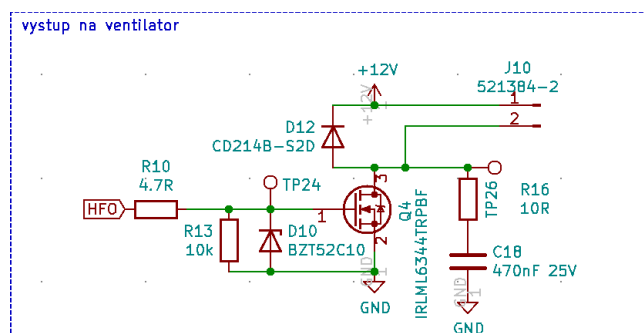


Obrázek 41 - Elektromotor s hřídelovou spojkou a snímačem otáček



Obrázek 42 - Kluzné ložisko

Na obrázku 43 je schématické zapojení spínání elektromotoru.



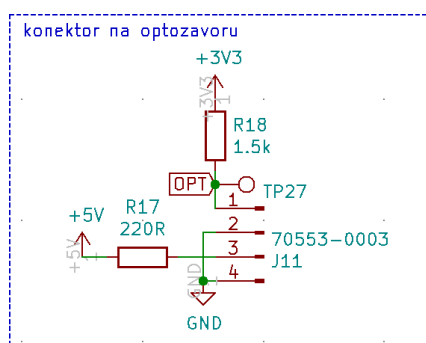
Obrázek 43 - Schéma spínání ventilátoru

Dioda D12 zde slouží jako ochrana tranzistoru proti vysokému napětí vlivem rozpojení tekoucího proudu indukčností v elektromotoru. Jako další ochranný člen je zde kombinace

rezistoru a kondenzátoru R16 a C18. Tento RC člunek pomáhá ochránit tranzistor proti proražení.

#### 4.6.2 Řízení ventilátoru

Vybraný elektromotor má rychlost otáčení až 20 000 otáček za minutu naprázdno. Pro zvýšení kvality pájení a cirkulace vzduchu bylo přistoupeno z možnosti regulace otáček. Jako snímací prvek byl zvolen optočlen. Na hřídeli elektromotoru je přerušovací kotouček, který přerušuje signál optozávory, a tím má řídicí jednotka informaci o frekvenci otáčení ventilátoru. Na obrázku 44 je vidět obvodové řešení. Pin 1 patří ke snímacímu fototranzistoru a díky odporu R18 na kladné napájení je k mikroprocesoru vyveden signál, který lze zpracovat. Pin 3 pak slouží k napájení vysílací LED v optozávore, která trvale svítí.



Obrázek 44 - Schéma zapojení zpětné vazby otáček

Pro řízení DC elektromotoru je s výhodou využita PWM regulace. Tranzistor spíná napájení podle středy signálu, a tím se mění otáčky. Softwarové řešení regulace je popsáno v kapitolách řešících návrh programu.

### 4.7 Vnější plášť

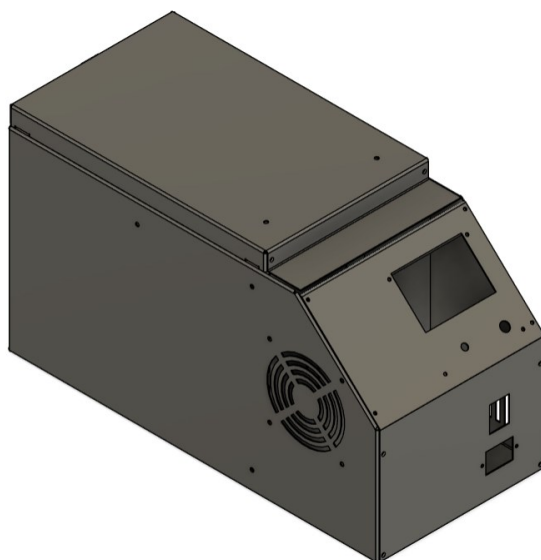
V této kapitole bude popsán návrh a výroba vnějšího pláště pájecí pece. Pro modelování byl využit software Autodesk Fusion s modulem sheet metal, který umožňuje pohodlně navrhovat plechové dílce vyráběné a ohýbané z železného plechu. Pro výrobu byla pak zvolena cesta zakázkového řezání a ohýbání ve specializované firmě.

#### 4.7.1 Materiál

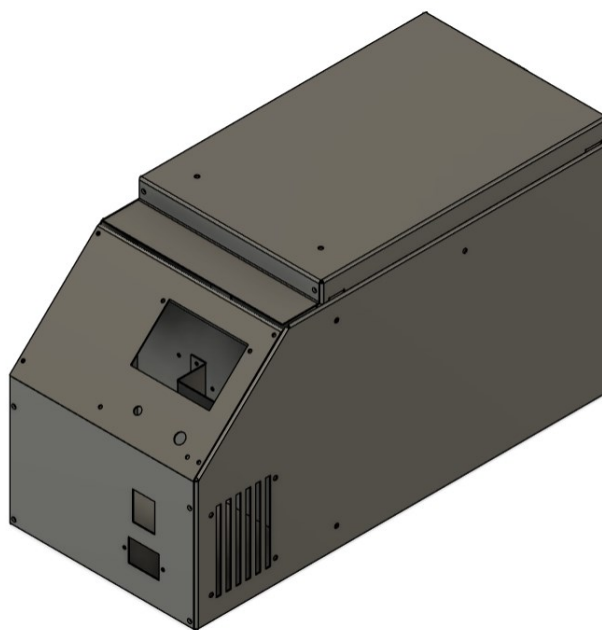
Jako materiál vnějšího pláště byl zvolen železný plech opatřený ochranným nátěrem. Je tedy důležité zamezit přiblížení jakýchkoliv živých částí k vodivému krytu a zároveň musí být kvalitně realizováno uzemnění. Díky stínícím vlastnostem plechu by mělo být vyzařování elektromagnetického rušení dostatečně potlačeno. Kov je i dostatečně pevný a odolný vůči zvýšeným teplotám. Zařízení bude mít větší hmotnost, než kdyby byl zvolen plast, ovšem není předpoklad častého přenášení pájecí pece, a proto je tato nevýhoda zanedbatelná. Železný plech má tloušťku 1 mm. Na vnitřní komoru pece je využit nerezový plech s tloušťkou 3 mm.

#### 4.7.2 Návrh

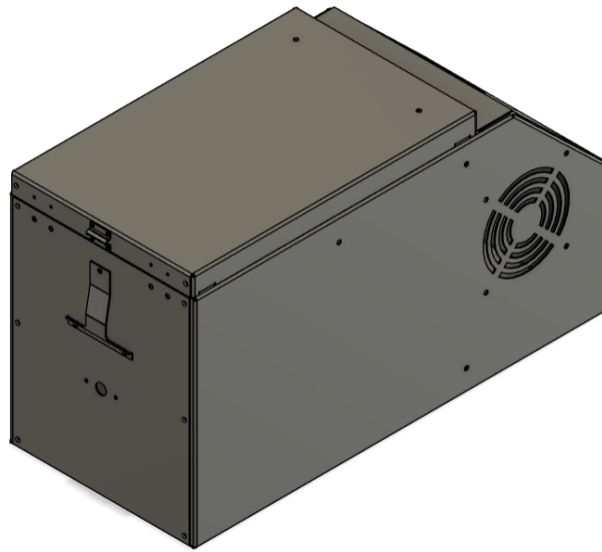
Vnější kryt i vnitřní komora pece jsou navrženy v programu Autodesk Fusion, který disponuje balíčkem pro návrh plechových dílů. Vizualizace je k vidění na obrázcích 45, 46 a 47.



**Obrázek 45 - Vizualizace konstrukce LP**



**Obrázek 46 - Vizualizace konstrukce PP**



**Obrázek 47 - Vizualizace konstrukce LZ**

#### **4.7.3 Výroba**

Výrobní data zpracuje specializovaná společnost, která zajistí vyřezání tvaru pomocí laserové řezačky a následně plech naohýbá na specializované ohýbačce. Poté zbývá jednotlivé díly k sobě spojit šroubovými spoji a pec zkompletovat. Foto je na obrázku 48 a 49.



**Obrázek 48 - Přední pohled na hotovou pec**



Obrázek 49 - Zadní pohled na hotovou pec

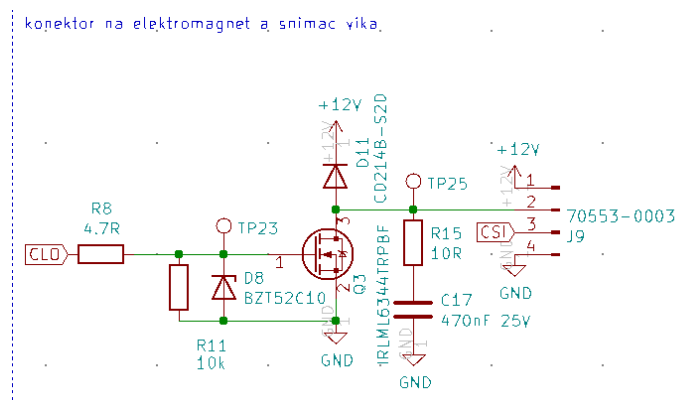
Výkresy jednotlivých dílů jsou v příloze D.

#### 4.7.4 Snímání a přidržení víka

Víko pájecí pece je nutné během pájení udržovat zavřené a utěsněné, aby nedocházelo k únikům tepla, a tím k narušení pájecího procesu. Ke snímání je vhodné využít elektrický kontakt, pomocí kterého dostane řídicí jednotka informaci o stavu víka. Ačkoli kontakt může být mechanický, byl pro tento návrh zvolen magnetický jazýčkový kontakt. Ten funguje tak, že při přiblížení permanentního magnetu dojde k sepnutí jazýčkových kontaktů uvnitř pouzdra. Narozdíl od mechanického kontaktu nedochází k přímému styku víka s kontaktem a je zde i jistá mechanická vůle, při které magnetický kontakt stále spolehlivě funguje. Nejsou tak kladeny vysoké nároky na přesnost konstrukce.

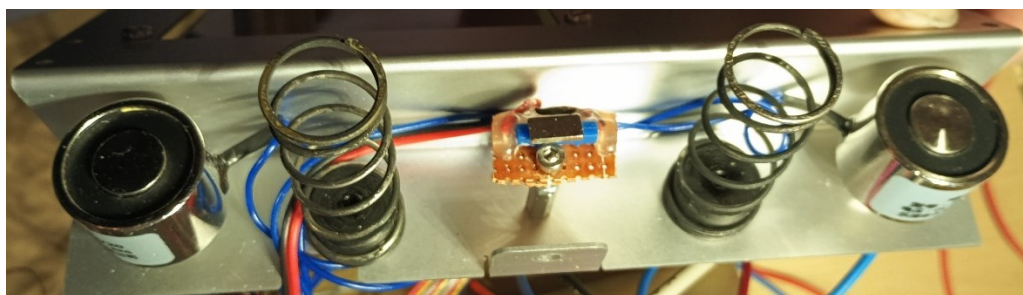
Samotné snímání by mohlo postačovat, ovšem bylo rozhodnuto o rozšiřující funkci, a tak má pájecí pec i schopnost přidržet víko. Při skončení pájení je totiž třeba desku nechat vychladit. Do doby, než teplota klesne pod určitou mez, není vhodné s deskou manipulovat, a jelikož by chladnutí v uzavřené peci trvalo moc dlouho, je vhodné zajistit alespoň odvětrání horkého vzduchu do okolního prostředí. Odvětrání lze provést uzavíratelnými klapkami nebo otevřením víka, a právě druhá zmíněná možnost je zde popsána a realizována. Víko v pozici uzavření komory tlačí na pružinu. Pružinu při uzavírání přetlačí uživatel a jakmile řídicí program zaznamená uzavřené víko, zapne elektromagnet, který bude víko následně držet. Po skončení pájení program uvolní elektromagnet a víko se vlivem síly pružiny pootevře a zůstane již pootevřené. Veškerý horký vzduch se v tu chvíli uvolní do okolního prostoru, protože teplý vzduch má nižší hustotu než vzduch chladný. Chladnutí DPS je tak zajištěno.

Schéma obvodového řešení je na obrázku 50. Pin 3 konektoru je vyveden na magnetický kontakt. Druhý konec magnetického kontaktu na pinu 4 je připojen na lokální zem. Mikroprocesor čte hodnotu, kdy při rozepnutí kontaktu je přítomna logická jednička díky pullup rezistoru integrovaném v mikroprocesoru.



Obrázek 50 - Schéma zapojení elektromagnetu a magnetického kontaktu

Piny 1 a 2 na konektoru slouží k připojení elektromagnetu. Jelikož je elektromagnet indukční zátěž, je nutné mít v zapojení ochrannou diodu a utlumovací člunek, zde D11, R15 a C17. Hodnoty součástek utlumovacího členu se vybírají dle zkušeností a předpokladů. Díky tomu nedojde k poškození tranzistoru vlivem napěťových špiček při rozpínání zátěže. Obvodové řešení u gate tranzistoru sestává z vybíjecího kondenzátoru R11, ochranné Zenerovy diody D8 a proud omezujícího rezistoru pro ochranu mikroprocesoru R8. Na obrázku 51 je k vidění skutečná realizace řešené části. Jsou zde dva elektromagnety a dvě pružiny. Uprostřed je přišroubovaný magnetický jazýčkový spínač, která reaguje na magnet umístěný na víku pece.



Obrázek 51 - Elektromagnety se snímačem víka a pružinami

## 4.8 Seznam součástek

V tabulkách 5, 6 a 7 je kompletní seznam součástek použitých při výrobě pájecí pece. Tabulka je rozdělena na tři části, přičemž první odpovídá součástkám pro řídicí jednotku, druhá patří k rozhraní člověk stroj a třetí část obsahuje veškeré vnější prvky, které nejsou přiletovány na DPS.

Tabulka 5 - Seznam součástek řídicího obvodu

Řídicí obvod			
Kód výrobce	Počet	Popis	Označení
ATMEGA4809-AFR	1	Mikroprocesor	U5
IRLML6344TRPBF	2	Mosfet tranzistor	Q3, Q4
MC-HVT1-S02-G	1	Piny na ventilátor	J1
521384-2	4	Konektor RAST 5	J2-J4, J10
ABT-436-RC	1	Bzučák	BZ1
CD214B-S2D	4	Dioda	D1, D5, D11, D12
MP001779	1	Konektor k HMI	J14
2211SM-04G-B1-TB	1	Programátor konektor	J8
70553-0003	2	Konektory 4 piny	J9, J11
CTB5202/2	2	Svorkovnice	J12, J13
MC32882	1	Tlačítko	SW1
T1635-600G-TR	1	Triak	D4
MOC3020SR2M	1	Optotriak	U2
H11L1SR2M	1	Optočlen	U3
696101000002	2	Držák pojistek	F1
1217133-1	3	Faston do DPS	J5-J7
DMG1012UW-7	2	Mosfet tranzistor	Q1, Q2
BZT52C10	4	10V Zenerova dioda 0,5 W	D6, D8-D10
PDZVTFTR10B	1	10V Zenerova dioda 1 W	D3
S2J	1	Diody	D2
MAX31856MUD+T	2	Převodník termočlásku	U6, U7
UA78M33CDCYR	1	Regulátor 3,3 V	U4
L7805CD2T-TR	1	Regulátor 5 V	U1
C0805C105K9RACTU	9	Kondenzátory 1 $\mu$ F 6,3 V	C2, C5-C12
C0805C105K4PACTU	2	Kondenzátor 1 $\mu$ F 16 V	C1, C4
BFC233810104	1	Kondenzátor 22 nF 400 V	C3
C0805C104K9RACTU	5	Kondenzátor 100 nF 6,3 V	C13-C16, C19
C0805C474K3RACAUTO	2	Kondenzátor 470 nF 25 V	C17, C18
C0805C103K3RACAUTO	4	Kondenzátor 10 nF 25 V	C20, C22, C23, C25
C0805C104K3RACTU	2	Kondenzátor 100 nF 25 V	C21, C24
C0805C103K8RACTU	1	Kondenzátor 10 nF 6,3 V	C26
MCMR08W4R70FTL	4	Rezistory 4,7 $\Omega$	R7, R8, R10, R14
CRGCQ2512J150R	1	Rezistor 150 $\Omega$ 200 V 1 W	R1, R21
CRGP1210F18K	2	Rezistor 18 k $\Omega$ 200 V 2 W	R2, R22-R24
MCPKNPA2SJ0330A10	1	Rezistor 33 $\Omega$ 400 V 2 W	R3
CRGP0805F470R	1	Rezistor 470 $\Omega$	R4
MCHP05W4F1200T5E	1	Rezistor 120 $\Omega$	R5
MCMR08X103 JTL	4	Rezistor 10 k $\Omega$	R6, R11-R13
RC0805FR-071R2L	1	Rezistor 1,2 $\Omega$	R9
MP000057	2	Rezistor 10 $\Omega$	R15, R16
MP001422	1	Rezistor 220 $\Omega$	R17
MP003627	1	Rezistor 1,5 k $\Omega$	R18
MC01W0805527K	1	Rezistor 27 k $\Omega$	R19

MCHP05W4F3300T5E	1	Rezistor 330 $\Omega$	R20
---	44	Test pointy	TP1-TP44
B72210S2251K101	1	Varistor	RV1
---	4	Montážní otvory	H1-H4
MCVVT6R3M102FB3L	1	Kondenzátor 1000 $\mu\text{F}$ 6,3 V	C27
15-91-0180	1	Konektor volných pinů	J15

**Tabulka 6 - Seznam součástek rozhraní člověk stroj**

Rozhraní člověk stroj			
Kód výrobce	Počet	Popis	Označení
EN11-HSM1AQ20	1	Rotační enkodér s tlačítkem	SW1
703-0100	1	LED	D1
BZT52C10	1	Dioda Zenerova	D2
---	4	Montážní otvory	H1-H4
DMG1012T-7	1	Mosfet tranzistor	Q1
"NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3"	1	Displej	---
MP001779	1	Konektor na řídicí desku	J1
C0805C105K9RACTU	6	Kondenzátor 1 $\mu\text{F}$ 6,3 V	C1-C6
08053C105KAT2A	9	Kondenzátor 1 $\mu\text{F}$ 25 V	C7-C15
AC0805JR-074K7L	10	Rezistor 4,7 k $\Omega$	R2-R11
ERJUP6J151V	1	Rezistor 150 $\Omega$	R1
CRGH1206F27R	1	Rezistor 27 $\Omega$	R12
CRGCQ0805J4R7	1	Rezistor 4,7 $\Omega$	R13
MCHVR05FTEW1002	1	Rezistor 10 k $\Omega$	R14
TMS-140-01-S-S	1	Piny na displej	J4
MC34749	1	Prototypový konektor	J3
---	25	Test pointy	TP1-TP25
---	1	Konektor podsvícení	J2

**Tabulka 7 - Seznam součástek externích prvků**

Externí prvky			
Kód výrobce	Počet	Popis	Označení
MP-11-70/55/E121B14H221	1	Havarijní teplotní rozpínač	---
PEL00883	1	Motor 12 V	---
PPS24	1	Spínač víka	---
C1353ATNAN	1	Hlavní vypínač s podsvícením	---
5120.0006.0	1	Euro konektor 230 V	---
P25/20 12VDC 8kg	1	Elektromagnet	---
TCST1030	1	Optozávora	---
MP001793	2	Konektor HMI $\Leftrightarrow$ řídicí jednotka	---

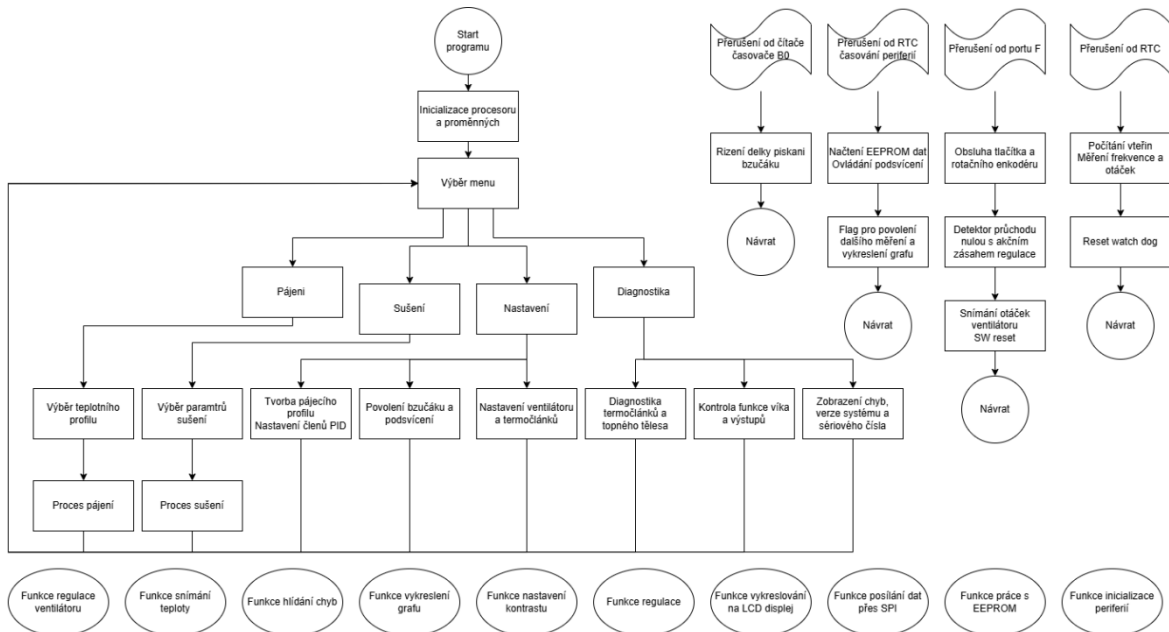
15-38-8040	2	Konektory k periferiím	---
XF-1545-FAR	2	Termočlánek J	---
MP001837	28	Piny	---
LUMBERG 3611 02 K01	4	Konektor RAST 5	---
KDE1209PTS1-13	1	PC ventilátor	---
NTCS-2R5-Imax 8 A	1	NTC termistor	---
030250 250G	1	Odporový drát	---
EPS-65-12	1	Spínaný zdroj 12 V	---
A1422261	1	Kolečko na rot. enkodér	---
HEAT350SC-2.5	1	Žárovzdorný vodič	---
POSAC-C13L-EUL30	1	Přívodní kabel	---

Mezi další materiál, použitý při konstrukci pece, patří velké množství šroubů, matic a podložek velikostí od M2 do M5, závitové tyče, gumové nohy, dutinky a vodiče, ocelový drát a panty. Pro filtraci nasávaného vzduchu chlazení elektroniky je instalováno ocelové síto. Pro upevnění DPS jsou zde distanční sloupky a v pájecí komoře se nachází sestava ventilátoru, topné těleso a rošt, na který se pokládají pájené desky plošných spojů. Pro lepší ovládání je na rotačním enkodéru umístěno ovládací kolečko. Na víku pece je nutné přidělat také madlo. Na plech ovládacího panelu jsou připevněny pružiny. Pro konverzi napětí 230 V na 12 V se v útrokách pece nachází spínaný zdroj stejnosměrného napětí.

## 5 Realizace SW

### 5.1 Blokové schéma

V této části je znázorněné blokové schéma programu pájecí pece. Obrázek 52 vizualizuje základní běh programu. Jedná se opravdu pouze o základní bloky a celý proces je velmi zjednodušený, protože program je velmi dlouhý a podrobný diagram by byl rozsáhlý a nepřehledný. Blokové schéma zde však poskytne dostatečný přehled o základní funkci.



Obrázek 52 - Blokové schéma programu

### 5.2 Důležité části programu

V této části budou popsány vybrané úryvky kódu, které jsou důležité pro pochopení celkové funkce. Celý program je napsán v jazyce C. Následující podkapitoly znázorňují všechny základní stavební bloky programu, které budou v této práci také vysvětleny. V programovém editoru je poslední příkaz na řádce číslo 5644. Program je psán tak, aby spolehlivě a bezpečně fungoval. Jsou brány v úvahu téměř všechny okrajové podmínky. Nechybí ani rozsáhlé diagnostické funkce, pomocí kterých lze v budoucnu odhalit špatně fungující část a navrhnout opravu. Funkce pájecí pece jsou také do velké míry nastavitelné podle preferencí uživatele. Například lze vypnout podsvícení či zvukovou indikaci. Program není v žádný moment zamrzlý a uživatel může kdykoli přerušit pájení nebo sušení. Kompletní zdrojový kód programu je v příloze C.

#### 5.2.1 Části deklarací a přiřazení

Před začátkem samotného programu se nachází část s deklaracemi a dalšími prvky, které používá hlavně kompilátor. Používané přiřazené knihovny jsou `avr/io`, `util/delay`, `stdio`, `avr/interrupt`, `avr/pgmspace`, `string`, `avr/eeprom`, `stdlib` a `avr/wdt`. Díky těmto knihovnám je psaní programu jednodušší, protože často obsahují připravené funkce pro řešení určitého

algoritmického problému. Dalším blokem je definování. V této části se číselné konstantě přiřadí text a pro programátora se zvyšuje čitelnost programu. Při změnách čísel je také daleko lepší změnit ho jen jednou na začátku, než vyhledávat, kde všude v programu je dané číslo použito. Například:

```
#define HEAT_DUT_VAL 30
```

znamená, že všude v programu, kde se nachází HEAT\_DUT\_VAL, překladač dosadí číslo 30. Při změně stačí pouze přepsat toto číslo na jiné a změna se aplikuje všude v programu. Další nezbytnou částí úvodu programu je vytvoření globálních proměnných a proměnných, které se používají v přerušeních. S tím souvisí i vytvoření bufferu pro displej a načtení konstant fondu a animace z paměti programu. Nakonec je třeba zmínit, že se zde nacházejí prototypy všech funkcí, protože překladač je jednodřuchodový a musí každou funkci znát ještě před tím, než se poprvé zavolá.

### 5.2.2 Nastavení procesoru

Nastavení procesoru je důležitý krok před samotným nahráním programu. Je velmi důležité ověřit správnost a být velmi opatrný s nastavováním, protože nevhodný zápis může zablokovat mikroprocesor tak, že již nebude možné s ním pracovat. Následující odstavce shrnou základní nastavení důležité pro pájecí pec.

Hlídaní nízkého napájecího napětí je důležité pro správný chod mikroprocesoru, protože při kolísání nebo nízké hodnotě může dojít k nesprávnému chodu oscilátoru. Také mohou nastat problémy se zapisováním do paměti EEPROM a kvůli nízkému napětí mohou také přestat fungovat některé periferie. Samozřejmě špatný účinek se projevuje i na ostatní obvody na desce plošných spojů, a proto je i v případě pájecí pece zapnuto hlídání takového stavu. Funkce mikroprocesoru se nazývá brown out detector. Zapíná se pomocí naprogramování takzvaných fuses. Aplikace sama nakonfiguruje patřičné registry. Výpis z programátoru vypadá následovně.

```
APPEND = 0x00 (valid)
BODCFG = 0x04 (valid)
BOOTEND = 0x00 (valid)
OSCCFG = 0x02 (valid)
SYSCFG0 = 0xE5 (valid)
SYSCFG1 = 0x07 (valid)
WDTCFG = 0x0B (valid)
```

V registrech je nakonfigurované i napětí, při kterém dojde k resetu. Dále zde lze najít nastavení reset pinu, zpoždění po zapnutí, uchování EEPROM při programování nebo nastavení základní frekvence oscilátoru. Základní frekvence je zvolena 20 MHz, ale pro vykonávání příkazů se ještě interně dělí.

Dalším nastavením je hlídací pes, známěji anglicky watchdog, který je důležitou součástí většiny aplikací mikroprocesoru. Zajistí totiž restart systému, pokud by došlo k zaseknutí programu. Například v tomto případě by zaseknutí programu vlivem náhodné chyby v paměti mohlo znamenat trvalé sepnutí topného tělesa na maximální výkon, což by mohlo vést až k požáru, a tím pádem velkým škodám na majetku. Princip činnosti je jednoduchý. V mikroprocesoru běží oscilátor, který generuje hodinový signál nezávislý na ostatních

hodinových signálech. Watchdog je v podstatě čítač, který pokud dočítá na konec, generuje restart mikroprocesoru. Do programu se tak na vhodné místo zakomponuje nulování tohoto čítače. V případě programu pájecí pece dochází k nulování od přerušení obvodu reálného času každou sekundu příkazem `wdt_reset()`. Jelikož perioda je nastavena na 8 s, k restartu od hlídacého psa za běžných podmínek nedojde.

Paměť EEPROM má při prvním spuštění nového mikroprocesoru nedefinované stavy, a proto je nutné nahrát alespoň základní počáteční hodnoty. Počáteční hodnoty paměti EEPROM se nahrávají pomocí programátoru PICKit4 ze souboru `EEPROM_pajeci_pec.eep`. Poté si již program čte a přepisuje data na základě požadavku uživatele.

### 5.2.3 Inicializace

Inicializace je první částí kódu, která proběhne po spuštění. Musí se zde proto nastavit veškerá komunikace a piny mikroprocesoru. Na začátku lze vidět nastavení oscilátoru, které je v zamčeném registru, a tak se nejprve provede odemčení. Po změně se registr opět uzamkne, protože je důležité, aby se hodinový kmitočet neměnil za běhu pájení. Následně se volá funkce inicializace portů, kde dojde k nastavení vstupně výstupních pinů, jejich přerušení, pull up rezistory i strmost hrany. Po přečtení hodnot z EEPROM paměti a nastavení SPI komunikace dojde k volání funkce, která nastaví LDC displej. Následuje nastavení obvodu reálného času a nastavení převodníků termočlánků. Zapne se podsvícení displeje, pokud je nastaveno a povolí se přerušení. Od této chvíle je mikroprocesor v podstatě připraven na provoz, ovšem ještě jsou zde řádky, které vykreslují animaci na displej a vypíší na něj základní informace o zařízení. Nakonec se zkontroluje, jestli neproběhl restart od obvodu watchdog, protože to by znamenalo, že se předtím program zasekl. Velmi důležitým prvkem je nastavení kontrastu displeje. Každý displej je totiž trochu jiný a pevně nastavená hodnota by nemusela vyhovovat na všech vyrobených produktech. Pokud tedy uživatel po spuštění pece drží stisknuté tlačítko po dobu celé inicializace, dojde ke spuštění nastavování kontrastu. Po potvrzení dalším stiskem se hodnota aplikuje a uloží do paměti EEPROM.

```
int main(void)
{
    //PROMENE
    int8_t MENU1_pozice = 0;
    uint8_t MENU1_vyber = 0;
    //NASTAVENI OSCILATORU -> 10MHz
    CPU_CCP = 0xD8;
    CLKCTRL_MCLKCTRLB = 0b00000001;
    CLKCTRL_MCLKLOCK = 1;
    //NASTAVENI PORTU
    PORT_INIT();
    //NACTENI POTREBNYCH DAT Z EEPROM
    readEEPROM();
    //INICIALIZACE SPI
    SPI0_CTRLB = 0b00000111;
    SPI0_CTRLA = 0b00100011;
    //INICIALIZACE LCD
    LCD_INIT();
    //LCD VSECHNY PIXELY OFF
    LCD_ClearScreen();
    //INICIALIZACE RTC a RTC_PIT
    RTC_CLKSEL = 0b00000001;
    while(RTC_PITSTATUS &(1<<0))
    ;
    RTC_PITCTRLA = 0b00111001;
```

```

RTC_PITINTCTRL = 1;
while(RTC_STATUS &(1<<2))
    ;
RTC_PER = 1024;

RTC_INTCTRL = 1;

while(RTC_STATUS &=(1<<0))
    ;
RTC_CTRLA |= 1;
//INICIALIZACE TERMOCLANKU
TEMP_INIT();
//VYPRAZDNIT BUFFER
memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
//Podsvetlení
if (EEPROM_LCD_BL)
{
    PORTA_OUTSET = 0b0000100;
}
else
{
    PORTA_OUTCLR = 0b0000100;
}
//POVOLENI PRERUSENI
CPU_SREG |= 1<<7;
sei();
//ANIMACE
memcpy_P(lcd_buffer, animation[0], 1024);
LCD_UpdateScreen();
_delay_ms(1000);
for (uint8_t i = 1; i<=11; i++)
{
    memcpy_P(lcd_buffer, animation[i], 1024);
    LCD_UpdateScreen();
    _delay_ms(200);
}
memcpy_P(lcd_buffer, animation[12], 1024);
LCD_UpdateScreen();
_delay_ms(1000);
memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
LCD_DrawString("Pajeci pec", 1, 35);
LCD_DrawString("Autor:", 3, 48);
LCD_DrawString("Matyas Buryanec", 4, 20);
LCD_DrawString("UPCE 2025", 6, 37);
LCD_DrawString("Verze 1.0", 7, 37);
LCD_UpdateScreen();
_delay_ms(2500);
//animace překrytí displeje
for (uint8_t i = 0; i < 64; i++)
{
    LCD_DrawLine( 0, i, 127, i);
    LCD_UpdateScreen();
    _delay_ms(25);
}
memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
TEMP_INIT();
BEEP_opakovani = 10;
BZUCAK_BEEP();
//ZMENA KONTRASTU
if((PORTE_IN & (1<<1)) == 0)
{
    TL_stisk = 0;
    memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
    NastaveniKontrastu();
    memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
    LCD_DrawString("Pajeci pec", 1, 35);
    LCD_DrawString("Autor:", 3, 48);
    LCD_DrawString("Matyas Buryanec", 4, 20);
    LCD_DrawString("UPCE 2025", 6, 37);
    LCD_DrawString("Verze 1.0", 7, 37);
    LCD_UpdateScreen();
    _delay_ms(2500);
    //animace překrytí displeje
    for (uint8_t i = 0; i < 64; i++)
    {

```

```

LCD_DrawLine( 0, i, 127, i);
LCD_UpdateScreen();
_delay_ms(25);
}
_delay_ms(200);
}
CHYBY(ZASEKNUTI_PROGRAMU);
.
.
.

```

## 5.2.4 Menu

Pájecí pec má několik úrovní menu. Vykreslování a pohyb v menu je řešen pomocí dvojice přepínačů, známějších pod pojmem switch. První slouží pro vykreslování ukazatele aktuálního výběru řešeným symbolem > na displeji. Druhý po stisku tlačítka spouští vybranou funkci nebo vstupuje do vybraného podmenu. Vše je řešeno vždy v nekonečné smyčce a neustále se aktualizuje vykreslení displeje. Tato metoda je velmi spolehlivá a programově čitelná, ovšem není šetrná k paměti. Po vstupu do podmenu se vše opakuje stejně. Zpátky do předchozího nadřazeného menu se vrací pomocí výběru nápisu Zpět, který zavolá příkaz return. Některé části, například nastavování proměnných, jsou tvořeny nekonečnou smyčkou přímo pod jedním případem, anglicky case. Tlačítkem se přeruší nekonečná smyčka a program se vrací na výběr v menu. Tabulka 8 znázorňuje veškeré části menu a jeho podmenu.

**Tabulka 8 - Kompletní seznam funkcí menu**

void FCE_Pajeni(void)	Podmenu na výběr typu pájení.
void FCE_Pajeni_Pb(void)	Pájení olovnatou pájkou.
void FCE_Pajeni_RoHS(void)	Pájení bezolovnatou pájkou.
void FCE_Pajeni_Vlastni(void)	Pájení vlastním profilem.
void FCE_Suseni(void)	Podmenu spuštění sušení.
void FCE_Nastaveni(void)	Podmenu nastavení parametrů.
void FCE_Nastaveni_PajeciProfil(void)	Nastavení pájecího profilu.
void FCE_Nastaveni_Regulace(void)	Nastavení parametrů regulace.
void FCE_Nastaveni_Bzucak(void)	Povolení zvukové indikace.
void FCE_Nastaveni_Podsvetleni(void)	Povolení posvícení.
void FCE_Nastaveni_Ventilator(void)	Nastavení otáček ventilátoru.
void FCE_Nastaveni_Termoclanek(void)	Nastavení převodníků termočlánků.
void FCE_Diagnostika(void)	Podmenu diagnostiky.
void FCE_Diagnostika_Termoclanek(void)	Diagnostika převodníků termočlánků.
void FCE_Diagnostika_TopneTeleso(void)	Diagnostika topného tělesa.
void FCE_Diagnostika_Ventilator(void)	Diagnostika ventilátoru.
void FCE_Diagnostika_Viko(void)	Diagnostika elektromagnetů a snímače víka.
void FCE_Diagnostika_Vystupy(void)	Diagnostika podsvícení, bzucháku a LED.
void FCE_Diagnostika_Info(void)	Zobrazení informací o pájecí peci.
void FCE_Diagnostika_Info_SerioveCislo(void)	Zobrazení sériového čísla mikroprocesoru.

Základní řešení hlavního menu je k vidění níže. Nachází se přímo v hlavní funkci main za inicializací. Pro přehlednost jsou další funkce podmenu pojmenovávány určitým klíčem a je snadné zjistit, odkud se daná funkce volá. Například funkce FCE\_Nastaveni se volá z hlavního menu, kdežto FCE\_Diagnostika\_Topneteleso se volá z podmenu FCE\_Diagnostika, která se volá z hlavního menu, a z názvu je patrné, že se jedná o diagnostický přístup k ovládnání topného tělesa a parametrům souvisejícím s ním. Kompletní přehled lze nalézt v elektronické příloze zdrojového kódu.

```

.
.
.
//HLAVNI SMYCKA
while (1)
{
    if (TL_stisk)
    {
        TL_stisk = 0;
        MENU1_vyber = 1;
    }

    if(MENU1_vyber == 0)
    {
        memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
        LCD_DrawString("Funkce:", 0, 0);
        LCD_DrawString("Pajeni", 1, 7);
        LCD_DrawString("Suseni", 2, 7);
        LCD_DrawString("Nastaveni", 3, 7);
        LCD_DrawString("Diagnostika", 4, 7);

        if (ROT_rotace == 1)
        {
            MENU1_pozice++;
            ROT_rotace = 0;
        }
        if (ROT_rotace == -1)
        {
            MENU1_pozice--;
            ROT_rotace = 0;
        }
        if (MENU1_pozice > 3)
        {
            MENU1_pozice = 0;
        }
        if (MENU1_pozice < 0)
        {
            MENU1_pozice = 3;
        }

        switch (MENU1_pozice){
            //Pajeni
            case 0:
                LCD_DrawString(">", 1, 0);
                LCD_DrawString(" ", 2, 0);
                LCD_DrawString(" ", 3, 0);
                LCD_DrawString(" ", 4, 0);
                break;
            //Suseni
            case 1:
                LCD_DrawString(" ", 1, 0);
                LCD_DrawString(">", 2, 0);
                LCD_DrawString(" ", 3, 0);
                LCD_DrawString(" ", 4, 0);
                break;
            //Nastaveni
            case 2:
                LCD_DrawString(" ", 1, 0);
                LCD_DrawString(" ", 2, 0);
                LCD_DrawString(">", 3, 0);
                LCD_DrawString(" ", 4, 0);
                break;
        }
    }
}

```



displejů neliší. V programu jsou vždy generovány potřebné obrazce a řetězce do bufferu, který je následně funkcí LCD\_UpdateScreen() celý poslán do řadiče displeje.

### 5.2.6 Ovládací prvky

K ovládání programu pájecí pece slouží rotační enkodér s tlačítkem. Programové řešení, které je k vidění níže, zahrnuje přerušení od příslušného portu a několik registrů fungujících jako flagy. V případě přerušení se musí nejprve nulovat příslušný flag bit nastavením jedničky na jeho pozici. Pokud je přerušení od tlačítka, nastaví se proměnná TL\_stisk a volá se funkce písknutí, která provede zvukovou indikaci, pokud je povolena. V momentě, kdy je přerušení generováno od rotačního enkodéru, musí se zjistit, na kterou stranu se pootočil. To se udělá tak, že se přečte stav druhého pinu. Na základě zjištěné hodnoty se nastaví proměnná ROT\_rotace buď na 1, nebo na -1. Program pro přečtení těchto proměnných zareaguje a nastaví je zpět na 0.

```
//PRERUSENI OD PORTU F
ISR(PORTF_PORT_vect) {
    //ROT ENKODER
    if (PORTF_INTFLAGS&(1<<0))
    {
        _delay_ms(4);
        PORTF_INTFLAGS = (1<<0);
        if (PORTF_IN&(1<<2))
        {
            ROT_rotace = 1;
        }
        else
        {
            ROT_rotace = -1;
        }
        if(Diagnostika_flag == 0)
        {
            BEEP_opakovani = 2;
            BZUCAK_BEEP();
        }
    }
    //TLACITKO
    if (PORTF_INTFLAGS&(1<<1))
    {
        PORTF_INTFLAGS = (1<<1);
        TL_stisk = 1;
        if(Diagnostika_flag == 0)
        {
            BEEP_opakovani = 5;
            BZUCAK_BEEP();
        }
        _delay_ms(4);
    }
    .
    .
    .
}
```

V přerušení je zakomponována i obsluha tlačítka umístěného na DPS, kde není běžně přístupné uživateli. Po stisku tohoto tlačítka se provede inicializace celé používané EEPROM paměti do výchozích hodnot a následně se spustí procedura, které zajistí SW restart mikroprocesoru. Tato funkce je vhodná při uvádění stroje do továrního nastavení a při odladování programu.

### 5.2.7 Regulace

Uvedená funkce realizuje výpočet regulačního akčního zásahu. Funkce přijímá na vstupu dvě hodnoty, jednak žádanou teplotu a aktuálně změřenou teplotu. Pokud dojde k zavolání

funkce se vstupními parametry nula a nula, vypne se regulace a vše s ní spojené se následně uvede do původního stavu. Naprogramovány jsou zde dva typy regulace. Dvoupolohová a PID, mezi nimiž si může uživatel vybírat pomocí menu pájecí pece. Dvoupolohová regulace je naprogramována pomocí IF funkcí a registrů paměti stavů. PID regulace je pak realizována naprogramovanou rovnicí přejatou z literatury v teoretické přípravě této práce. Byl zvolen přírůstkový tvar regulace, který se vyznačuje tím, že po doregulování na minimální regulační odchylku udržuje poslední spočítaný regulační zásah a nepříčítá nové korekce. Derivační složka regulátoru má také implementovaný filtr, neboť jinak by mohla zesilovat šum, což je nežádoucí. Jednoduchou implementací ochrany proti windup efektu I složky regulátoru bylo docíleno spolehlivého fungování a kvalitní regulace. Na konci funkce se spočítaná akční veličina nakopíruje do proměnné HEAT\_DUT, kde je používána pro realizaci spínání topného tělesa.

```
void Regulace(uint16_t teplota_zadana, uint16_t teplota_skutecna){
    if (HEAT_ON_flag == 0)
    {
        e_1 = 0.0;
        e_2 = 0.0;
        ef_1 = 0.0;
        ef_2 = 0.0;
        u_1 = 0.0;
        HEAT_ON_flag = 1;
        PORTB_OUTCLR = 1; //pokud topi, pokud netopi tak zhasnout
    }
    nebo neco takoveho

    //spinat topne teleso v nule a vykon regulovat poctem sepnutych pulvln (softwarové
    PWM)

    if((teplota_zadana == 0) && (teplota_skutecna == 0))//Pri vstupu 0 a 0 vypnout
    regulaci
    {
        ZCD_REG = 0;
        HEAT_OFF_flag = 1;
        PORTB_OUTSET = 1;
        return;
    }
    else
    {
        if((EEPROM_PID_P == 100) && (EEPROM_PID_I == 0) && (EEPROM_PID_D == 0))//Pri
        P slozce 100 a ostatni 0 prepnout regulator na ON/OFF mod
        {
            // pridat hysterezi 2 K
            if (REG_ONOFF_STAV_MEM)
            {
                if (teplota_skutecna >= (teplota_zadana + 1))
                {
                    HEAT_DUT = 0;
                    REG_ONOFF_STAV_MEM = 0;
                }
            }
            else
            {
                if (teplota_skutecna <= (teplota_zadana - 1))
                {
                    HEAT_DUT = HEAT_DUT_VAL;
                    REG_ONOFF_STAV_MEM = 1;
                }
            }
        }
        else//PID regulace
        {
            //normovani hodnot, ochrana proti
            nadmernemu integrovani do vysokych cisel, filtr pro D slozlu

            //normovani
            konstant a prevedeni do spravneho tvaru (vstup je procento zásahu dané konstanty)
        }
    }
}
```

```

float Kp = (float)(EEPROM_PID_P) * 2; // / 2.0;
//hodnoty 0 až 100
float Ti = (float)(101 - EEPROM_PID_I) / 10.0;
float Td = (float)(EEPROM_PID_D) / 400.0;
const float h = 0.25; // Časový krok

float b0 = 0.5;
float b1 = 0.3;
float b2 = 0.2;

if (EEPROM_PID_I == 0)
{
    Ti = 10000; //vypnutí integrační složky
}

float e = (float)(teplota_zadana) - (float)(teplota_skutecna); //normovani
hodnot
e = e / 350;

float ef = b0 * e + b1 * e_1 + b2 * e_2;

float delta_u = (Kp * (e - e_1)) + (((Kp * h) / Ti) * e) + (((Kp * Td) / h)
* (ef - (2 * ef_1) + ef_2));
e_2 = e_1;
e_1 = e;
ef_2 = ef_1;
ef_1 = ef;

float u = u_1 + delta_u;

//denormovani hodnot (asi není třeba)
if (u > HEAT_DUT_VAL) // Maximální hodnota
{
    delta_u = 0;
    u_1 = HEAT_DUT_VAL;
}
if (u < 0) // Minimální hodnota
{
    delta_u = 0;
    u_1 = 0;
}

u = u_1 + delta_u;
u_1 = u;

HEAT_DUT = (uint8_t)(u);
}
return;
}

```

Část kódu zobrazená níže zajišťuje aplikování akčního zásahu vypočítaného pomocí funkce regulace. Celé se to odehrává v přerušení od pinu portu F, na který je připojen obvod detekce průchodu nulou. Hlavním důvodem je navázání řízení topného tělesa na periodický průběh síťového napětí. Na začátku funkce se vynuluje bit spouštějící přerušení, aktualizuje se registr pro počítání síťové frekvence a přistoupí se k řešení samotného řízení výkonu. Řízení výkonu je realizováno pomalým PWM signálem synchronizovaným na sinusový průběh napětí v elektrické síti. Signál, modulovaný šířkou pulsu, je generován softwarově tím, že při každém volání přerušení od detektoru průchodu nulou se přičte jednička k definované proměnné ZCD\_REG. Pokud je hodnota v této proměnné menší než hodnota HEAT\_DUT, která je aktualizovaná ve funkci regulace, zapne se triak topného tělesa. V opačném případě se triak rozpojí při prvním průchodu nulou a topné těleso se vypne. K resetování hodnoty

ZCD\_REG dochází při dočítání na hodnotu v proměnné HEAT\_DUT\_VAL. Ta je definovaná na začátku programu a odpovídá periodě PWM signálu.

```
//ZERO CROSSING DETECTOR
if (PORTF_INTFLAGS&(1<<4))
{
    PORTF_INTFLAGS = (1<<4);
    ZCD_POČITANI++;

    if (ZCD_REG < HEAT_DUT_VAL)
    {
        ZCD_REG++;
    }

    if (HEAT_ON_flag)
    {
        if (ZCD_REG <= HEAT_DUT)
        {
            //zapnout topeni
            PORTB_OUTSET = (1<<5);
        }
        else
        {
            //vypnout topeni
            PORTB_OUTCLR = (1<<5);
        }
        if (ZCD_REG >= HEAT_DUT_VAL)//vybrat tím periodu PWM
        {
            ZCD_REG = 0;
            if (HEAT_OFF_flag)
            {
                HEAT_ON_flag = 0;
                HEAT_OFF_flag = 0;
                PORTB_OUTCLR = (1<<5);
            }
        }
    }
}
```

Uvedeným algoritmem a řešením problematiky funkce se oddělil akční zásah od jeho výpočtu, což se podepsalo na pohodlnějším psaní programu a spolehlivější funkci.

### 5.2.8 Pájení

Funkce pájení je klíčová pro pájecí pec. Celá část je rozdělena na pět částí. Každá část odpovídá jednomu pájecímu cyklu. Při volání této funkce se jí předávají parametry časů a cílových teplot pro každou fázi. Na začátku je však nejprve čekání na zavření víka pece. Po uzavření víka se již spustí první fáze pájení. Po celou dobu provozu se pravidelně kontroluje stisknutí tlačítka, protože proces musí být uživatelem přerušitelný. Níže se nachází úryvek kódu pro v pořadí třetí fázi pájení.

```
//SEKCE 3
CAS_Pajeni = cas3;
if (cas3 > 1)
{
    do
    {
        //FUNKCE KONTROLY TLACITKA PRO OPUSTENI PAJENI A OSTATNICH STAVU PRI KTERYCH DOJDE K
        VYPNUTI PAJENI POZOR NUTNE VYPNOUT REGULACI A TAK PRI OPUSTENI
        if (TL_stisk)
        {
            uint8_t lcd_backup[sizeof(lcd_buffer)];
            memcpy(lcd_backup, lcd_buffer, sizeof(lcd_buffer));
            CAS_Pajeni_POM = CAS_Pajeni;
            memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
            TL_stisk = 0;
            CAS_Pajeni = 6;
            while (CAS_Pajeni)
```

```

    {
        if (TL_stisk)
        {
            VENTILATOR_RIZENI(0);
            Regulace(0,0);
            PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
            TL_stisk = 0;
            return 1;
        }
        LCD_DrawString(">Zpet do menu?", 3, 25);
        LCD_DrawString("Pokracovat za: s", 7, 0);
        LCD_DrawNumber((uint16_t)CAS_Pajeni, 7, 88);
        LCD_UpdateScreen();
    }
    memcpy lcd_buffer, lcd_backup, sizeof lcd_buffer);
}
if (CAS_Pajeni == 0)
{
    CAS_Pajeni = CAS_Pajeni_POM;
    CAS_Pajeni_POM = 0;
}
while (PORTF_IN & (1<<3)) //otevreni vika v prubehu
{
    //vse vypnout
    VENTILATOR_RIZENI(0);
    Regulace(0,0);
    PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
    return 2;
}
//Dalsi chyby_____!!!
CHYBY(CHYBA_TERMOCLANKU1);
CHYBY_OBOU_TERM = EEPROM_CHYBA;
CHYBY(CHYBA_TERMOCLANKU2);
if ((EEPROM_CHYBA == 2) && (CHYBY_OBOU_TERM == 1))
{
    CHYBY_OBOU_TERM = 1;
}
else
{
    CHYBY_OBOU_TERM = 0;
}
CHYBY(CHYBA_VENTILATORU);
CHYBY(CHYBA_TOP_TEL);
if (CHYBY_OBOU_TERM)//oba termoclanky v chybe
{
    //vse vypnout
    VENTILATOR_RIZENI(0);
    Regulace(0,0);
    PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
    return 3;
}
if (EEPROM_CHYBA == 3)//topne teleso v chybe
{
    //vse vypnout
    VENTILATOR_RIZENI(0);
    Regulace(0,0);
    PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
    return 4;
}
if (EEPROM_CHYBA == 4)//ventilator v chybe
{
    //vse vypnout
    VENTILATOR_RIZENI(0);
    Regulace(0,0);
    PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
    return 5;
}
//Podle flagu od preruseni PIT 0,25s
if (ZmerARegulace_flag)
{
    ZmerARegulace_flag = 0;
    zmerena_teploata = GET_TEMP();
    if (zmerena_teploata == 0xFFFF)
    {
        VENTILATOR_RIZENI(0);
    }
}

```

```

        Regulace(0,0);
        PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
        return 7;
    }
    if (teplota3 > teplota2)
    {
        teplota3_pom = ((teplota3-teplota2) - (CAS_Pajeni*(teplota3-
teplota2)/cas3));
        teplota3_pom += teplota2;
    }
    else
    {
        teplota3_pom = teplota3;
    }
    Regulace(teplota3_pom, zmerena_teplota);
    //v dalsich sekcich upravit
    VENTILATOR_RIZENI(EEPROM_VENTILATOR);
    int16_t odchylka_P = 80;
    int16_t odchylka_N = 80;
    if (odchylka_N > teplota3_pom)
    {
        odchylka_N = teplota3_pom;
    }
    if ((zmerena_teplota > (teplota3_pom + odchylka_P)) || (zmerena_teplota <
(teplota3_pom - odchylka_N))//prilis rozdilne teploty realna od zadany
    {
        if (pocitadlo_chyb > 4)
        {
            //vse vypnout
            VENTILATOR_RIZENI(0);
            Regulace(0,0);
            PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
            return 6;
        }
        else
        {
            pocitadlo_chyb++;
        }
    }
}
//teplota na regulaci: pocatecni teplota, koncova teplota, cas na zmenu; vzorec
if (DRAW_GRAF_flag)
{
    DRAW_GRAF_flag = 0;
    DRAW_GRAF(teplota3_pom, zmerena_teplota, teplota3, CAS_Pajeni,
(uint16_t)((cas3-CAS_Pajeni) + cas1 + cas2), 3);
} while (CAS_Pajeni);
}
pocitadlo_chyb = 0;

```

Na začátku je také přítomná část programu sloužící k opuštění pájení. Následuje test všech možných chyb a podmínek, při kterých je nutné funkci ukončit. Pokud se tak stane, na displeji se zobrazí hláška o předčasném ukončení pájení a číselný kód, pomocí kterého lze zjistit, co bylo příčinou. Dalším blokem je pravidelné volání měření teploty a volání regulace. Časování po 0,25 s je zajištěno pomocí obvodu reálného času, který pravidelně nastaví globální proměnnou sloužící jako flag. Následuje ošetření záporných hodnot a generování aktuální žádané teploty. Tím se zajistí tvorba naprogramované teplotní rampy. Dále se zavolá regulace otáček ventilátoru a program přechází do závěrečné části, kde se kontroluje velikost odchylky teplot a vykresluje se graf pomocí volání funkce DRAW\_GRAF. Znázorněná část kódu je v programu pětkrát s tím, že se vždy mění předchozí teplota, cílová teplota a čas trvání. Uvedené řešení je spolehlivé a kontroluje velké množství chybových stavů.

## 5.2.9 Sušení

Funkce sušení je vedlejší funkcí pájecí pece. Lze pomocí ní například vysoušet součástky, pokud došlo k jejich navlhnutí nebo pokud to jejich kategorie před pájením vyžaduje. V peci se však dají sušit i další materiály jako například kovy opatřené ochranným nátěrem vyžadujícím k vytvrzení zvýšenou teplotu. Parametry sušení uživatel nastavuje přímo před spuštěním a lze zde nastavit i rychlost náběhu teploty, což je důležité pro bezpečné zahřátí určitých komponent. Po docílení požadované teploty se spustí časovač a pec udržuje konstantní vnitřní prostředí. Níže uvedený kód má vynechány části s kontrolou chyb a kontrolou tlačítka, protože se tyto části neliší od kontroly chyb a tlačítka ve funkci pájení. Kód začíná po kontrole zavřeného víka.

```
POCITADLO_VTERINY = 0;
.
.
.
        memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
        //zahřivat pouze maximalni rychlostí nabehu - kazdou sekundu pricist k
zadane teplotě hodnotu strmosti az do zadani kkoncove teploty
        if (POCITADLO_VTERINY*rychlost_nabehu >= teplota)
        {
                POCITADLO_VTERINY = (teplota / rychlost_nabehu);
        }

        //Podle flagu od preruseni PIT 0,25s
        if (ZmerARegulace_flag)
        {
                ZmerARegulace_flag = 0;
                zmerena_teplota = GET_TEMP();
                if (zmerena_teplota == 0xFFFF)
                {
                        VENTILATOR_RIZENI(0);
                        Regulace(0,0);
                        PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
                        return 7;
                }
                Regulace((POCITADLO_VTERINY*rychlost_nabehu), zmerena_teplota);
                VENTILATOR_RIZENI(EEPROM_VENTILATOR);
        }
.
.
.
        LCD_DrawString("Zahřivani", 3, 30); //Zahřivani
        LCD_DrawString("T zadana:      C", 5, 0); //Teplota zadana
        LCD_DrawNumber(teplota, 5, 72);
        LCD_DrawChar(0, 5, 90);
        LCD_DrawString("T aktualni:    C", 6, 0); //Teplota aktualni
        LCD_DrawNumber(zmerena_teplota, 6, 72);
        LCD_DrawChar(0, 6, 90);
        LCD_UpdateScreen();
    } while (zmerena_teplota < (teplota-(teplota/10)));
    CAS_Pajeni = cas*60;
    do
    {
.
.
.
        memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
        //Podle flagu od preruseni PIT 0,25s
        if (ZmerARegulace_flag)
        {
                ZmerARegulace_flag = 0;
                zmerena_teplota = GET_TEMP();
                if (zmerena_teplota == 0xFFFF)
                {
                        VENTILATOR_RIZENI(0);
                        Regulace(0,0);
                        PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
```

```

        return 7;
    }
    Regulace(teplota, zmerena_teploata);
    VENTILATOR_RIZENI (EEPROM_VENTILATOR);
}
LCD_DrawString("Probiha suseni", 3, 15); //Probiha suseni
LCD_DrawString("T zadana:      C", 5, 0); //Teplota zadana
LCD_DrawNumber(teplota, 5, 72);
LCD_DrawChar(0, 5, 90);
LCD_DrawString("T aktualni:    C", 6, 0); //Teplota aktualni
LCD_DrawNumber(zmerena_teploata, 6, 72);
LCD_DrawChar(0, 6, 90);
LCD_DrawString("Zbyvajici cas:   min", 7, 0); //Zbyvajici cas
LCD_DrawNumber(((CAS_Pajeni/60) + 1), 7, 90);
LCD_UpdateScreen();
.
.
.
} while (CAS_Pajeni);

//vse vypnout

VENTILATOR_RIZENI(0);
Regulace(0,0);
PORTB_OUTCLR = 0b00000010;
return 0;
}

```

### 5.2.10 Ventilátor

Pro regulaci otáček ventilátoru byl naprogramován P regulátor. Níže je k vidění funkce VENTILATOR\_RIZENI, která po zavolání s hodnotou požadovaných otáček reguluje PWM signál ovládající DC motor ventilátoru. Tato funkce se v programu volá v pravidelných intervalech stejně jako funkce regulace topného tělesa. Pokud jsou požadované otáčky nulové, provede se vypnutí ventilátoru. V případě, že jsou nenulové, spustí se a nastaví čítač časovač TCA0, pokud ještě není. Módem provozu je jednoduché PWM. Následně se vypočítá hodnota duty\_cycle, která se vloží do příslušného registru čítače časovače. Nesmí chybět ani hlídání mezí a paměť na hodnotu z minulého volání funkce. Snímání otáček ventilátoru je řešeno tak, že se v přerušení od optozávory inkrementuje definovaný registr. V momentě pravidelného přerušení po jedné sekundě od obvodu reálného času se uloží aktuální hodnota a registr se nuluje. Uložená hodnota přímo odpovídá frekvenci otáčení neboli počtu otáček za jednu sekundu. Přepočítání na počet otáček za minutu je pak již snadný. Na stejném principu funguje i měření frekvence průchodu nulou.

```

//FUNKCE RIZENI VENTILATORU
void VENTILATOR_RIZENI (uint16_t otacky_nastavene){
    uint16_t duty_cycle = 0;
    if (otacky_nastavene > 0)
    {
        //spustit ventilator a pokud uz je tak generovat pwm podle regulace
        if((TCA0_SINGLE_CTRLA & (1<<0)) == 0)
        {
            TCA0_SINGLE_CTRLB = 0b00010011;
            TCA0_SINGLE_CTRLC = 0b00000001;

            TCA0_SINGLE_CMP0 = 0; //duty cycle
            TCA0_SINGLE_PER = 0xFFFF; //period

            TCA0_SINGLE_CTRLA = 0b00000001;

            VENT_START_flag = 1;
            PP = 10;
        }
        // Otacky 0 - 10 000, duty cycle 0 - 65535
    }
}

```

```

if (otacky_nastavene > (VENT_FREKVENCE*60))
{
    while (((otacky_nastavene - (VENT_FREKVENCE*60))*PP) > 40000)
    {
        PP--;
    }
    duty_cycle = (otacky_nastavene - (VENT_FREKVENCE*60))*PP;
}
else
{
    duty_cycle = duty_cycle_minule;
    if(((int)(VENT_FREKVENCE*60) - (int)(otacky_nastavene)) > 700)
    {
        duty_cycle -= 80;
    }
}
duty_cycle_minule = duty_cycle;
if (duty_cycle > 30000)
{
    duty_cycle = 30000;
}
TCA0_SINGLE_CMP0 = duty_cycle;//duty cycle
int VENT_ODCH = ((int)(otacky_nastavene) - (int)(VENT_FREKVENCE*60));
if ((VENT_ODCH > 1000) || (VENT_ODCH < -1000))
{
    if (VENT_ODCH > 1000)
    {
        PP++;
    }
    if (VENT_ODCH < -1000)
    {
        PP--;
    }
}
}
else
{
    //stopnout ventilator

    //dekrementovat postupne k nule

    while (duty_cycle_minule > 1000)
    {
        duty_cycle_minule -= 1000;
        TCA0_SINGLE_CMP0 = duty_cycle_minule;
        _delay_ms(10);
    }

    TCA0_SINGLE_CTRLA = 0b00001110;
    PORTA_OUTCLR = 0b00000001;
    VENT_START_flag = 0;
}
}

```

### 5.2.11 Hlídaní chyb

Během funkce se může vyskytnout chyba, kvůli které by například pájení nebylo správné. V tom případě je důležité proces přerušit a oznámit situaci uživateli. K tomu slouží část programu níže. Voláním funkce CHYBY s číslem chyby, která nás zajímá, dojde k testu na tu konkrétní chybu. Při potvrzení přítomnosti chyby se tato informace uloží do EEPROM paměti. Jak je vidět, je zde hlídání chyb zaseknutí programu, termočlánků, topného tělesa a ventilátoru. Jinde v programu je ještě hlídání chyby příliš rozdílné teploty mezi termočlánky. Číslo chyby se zobrazí v diagnostice v podmenu Info. Po přečtení poslední chyby se příslušná EEPROM paměť vynuluje, aby bylo možné nasnímat budoucí chybu.

```

//FUNKCE KONTROLY CHYB
void CHYBY(uint8_t cislo_chyby){
    uint8_t symbol_erroru = 0;

```

```

switch (cislo_chyby)
{
    case ZASEKNUTI_PROGRAMU:
    if (RSTCTRL_RSTFR & (1<<3))
    {
        symbol_erroru = 5;
    }
    break;

    case CHYBA_TERMOCLANKU1:
    if ((PORTE_IN & (1<<1)) == 0)
    {
        symbol_erroru = 1;
        MAX31856_1_writeRegister(CR0, 0b10010111);
    }
    break;

    case CHYBA_TERMOCLANKU2:
    if ((PORTE_IN & (1<<3)) == 0)
    {
        symbol_erroru = 2;
        MAX31856_2_writeRegister(CR0, 0b10010111);
    }
    break;

    case CHYBA_TOP_TEL://ztrata signalu ZCD
    if (ZCD_FREKVENCE == 0)
    {
        symbol_erroru = 3;
    }
    break;

    case CHYBA_VENTILATORU://i pres vysoke pwm se netoci, osetrit roztaceni
    if (VENT_CHYBA_flag && VENT_START_flag)
    {
        VENT_CHYBA_flag = 0;
        if (VENT_CHYBA_POC < 10)
        {
            VENT_CHYBA_POC++;
            break;
        }
        else
        {
            VENT_CHYBA_POC = 0;
            if (VENT_CHYBA_DUT > 6000)
            {
                symbol_erroru = 4;
            }
        }
    }
    break;

    default:
    //spatne volani funkce
    break;
}
if (symbol_erroru != 0)
{
    readEEPROM_flag = 0;
    //EEPROM_CHYBA = symbol_erroru;
    //writeEEPROM();
    readEEPROM_flag = 1;
}
}

```

### 5.2.12 Snímání teploty

Část kódu níže se stará o získání aktuální teploty z termočlánků. Jelikož se na DPS nacházejí dva převodníky pro termočlánek, je nutné uvažovat i případ, kdy jeden je v chybě a druhý je funkční, nebo kdy ani jeden z nich nefunguje. Funkce proto získá teplotu, pouze pokud není daný převodník v chybě. Návratová hodnota je teplota od převodníku, který je v pořádku, případně průměr teplot obou převodníků, pokud fungují oba. Je zde přítomno i hlídání příliš

velkého rozdílu mezi termočlánky, což by mohlo znamenat nerovnoměrný ohřev nebo jiný problém. Samotné převodníky se inicializují na začátku programu pomocí funkce TEMP\_INIT a některé jejich parametry a nastavení se dají měnit v menu nastavení termočlánků.

```
//Ziskani teploty z termoclanků
uint16_t GET_TEMP(void){
    uint16_t teplota1 = 0;
    uint16_t teplota2 = 0;
    uint16_t teplota = 0;
    uint8_t POM_Reg = 0;
    uint8_t fail_term_1 = 1;
    uint8_t fail_term_2 = 1;

    //pokud neni v chybe_1
    if ((PORTE_IN & (1<<1)) && ((PORTE_IN & (1<<0)) == 0))
    {
        fail_term_1 = 0;
        uint8_t MSB = MAX31856_1_readRegister(LTCBH);
        uint8_t LSB = MAX31856_1_readRegister(LTCBM);
        LSB = LSB & 0b11110000;
        LSB = LSB >> 4;
        POM_Reg = MSB & 0b00001111;
        POM_Reg = POM_Reg << 4;
        LSB = LSB | POM_Reg;
        MSB = MSB & 0b01110000;
        MSB = MSB >> 4;
        teplota1 = (MSB << 8) | LSB;
    }

    //pokud neni v chybe_2
    if ((PORTE_IN & (1<<3)) && ((PORTE_IN & (1<<2)) == 0))
    {
        fail_term_2 = 0;
        uint8_t MSB = MAX31856_2_readRegister(LTCBH);
        uint8_t LSB = MAX31856_2_readRegister(LTCBM);
        LSB = LSB & 0b11110000;
        LSB = LSB >> 4;
        POM_Reg = MSB & 0b00001111;
        POM_Reg = POM_Reg << 4;
        LSB = LSB | POM_Reg;
        MSB = MSB & 0b01110000;
        MSB = MSB >> 4;
        teplota2 = (MSB << 8) | LSB;
    }

    if ((fail_term_2 == 1) && (fail_term_1 == 0))
    {
        teplota_minula = teplota1;
        return teplota1;
    }

    if ((fail_term_1 == 1) && (fail_term_2 == 0))
    {
        teplota_minula = teplota2;
        return teplota2;
    }
    if (fail_term_1 && fail_term_2)
    {
        return teplota_minula;
    }

    //oba v poradku (overit jestli neni prilis velky rozdil teplot)

    if ((teplota1 > teplota2 && teplota1 - teplota2 > 25) ||
        (teplota2 > teplota1 && teplota2 - teplota1 > 25))
    {
        readEEPROM_flag = 0;
        EEPROM_CHYBA = 6;
        writeEEPROM();
        readEEPROM_flag = 1;
        return 0xFFFF;
    }
}
```

```

    }
    teplota = ((teplota1 + teplota2) / 2);
    teplota_minula = teplota;
    return teplota;
}

```

### 5.2.13 EEPROM

Nonvolatilní paměť EEPROM je v programu používána pro uchování různých dat a nastavených parametrů i po vypnutí napájení. Níže je k vidění funkce writeEEPROM, která zapíše modifikované proměnné do paměti, a funkce readEEPROM, která data z paměti čte. Pro zápis se používá předpřipravená funkce eeprom\_update\_byte pro osm bitů nebo eeprom\_update\_word pro 16 bitů, která zajistí, že nedojde k zapisování, pokud se zapisovaná hodnota neliší od stávající. Tím se šetří životnost paměti. Funkce čtení pak vyčítá uložená data na patřičných adresách. Adresy a názvy jsou definovány ručně na začátku programu. Samotné volání těchto funkcí je řešeno následovně. Vyčítání dat z EEPROM je voláno periodicky po 0,25 s od periferie obvodu reálného času. Tím je zajištěno, že i při modifikacích program pracuje s neaktuálnějšími hodnotami. Vyčítání se provede, pouze pokud je nastaven flag čtení. To je důležité kvůli zápisu do EEPROM. Při zápisu se totiž modifikované hodnoty v pomocných registrech uloží do proměnných a následně se zavolá funkce zápisu. Během toho se nesmí číst, protože by došlo k přepsání nových hodnot. Po ukončení zápisu se opět nastaví flag čtení a program pokračuje dál.

```

//ZAPIS DO EEPROM
void writeEEPROM(void) {
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_LCD_BL, EEPROM_LCD_BL);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_P, EEPROM_PID_P);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_I, EEPROM_PID_I);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_D, EEPROM_PID_D);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_BZUCAK, EEPROM_BZUCAK);
    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_VENTILATOR, EEPROM_VENTILATOR);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CHYBA, EEPROM_CHYBA);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_KONTRAST, EEPROM_KONTRAST);

    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA1, EEPROM_TEPLOTA1);
    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA2, EEPROM_TEPLOTA2);
    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA3, EEPROM_TEPLOTA3);
    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA4, EEPROM_TEPLOTA4);
    eeprom_update_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA5, EEPROM_TEPLOTA5);

    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS1, EEPROM_CAS1);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS2, EEPROM_CAS2);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS3, EEPROM_CAS3);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS4, EEPROM_CAS4);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS5, EEPROM_CAS5);

    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMTYPE1, EEPROM_TERMTYPE1);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMTYPE2, EEPROM_TERMTYPE2);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMMASK1, EEPROM_TERMMASK1);
    eeprom_update_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMMASK2, EEPROM_TERMMASK2);
}

//CTENI Z EEPROM
void readEEPROM(void) {
    if (readEEPROM_flag)
    {
        EEPROM_LCD_BL           = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_LCD_BL);
        EEPROM_PID_P            = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_P);
        EEPROM_PID_I            = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_I);
        EEPROM_PID_D            = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_PID_D);
        EEPROM_BZUCAK           = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_BZUCAK);
        EEPROM_VENTILATOR       = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_VENTILATOR);
        EEPROM_CHYBA            = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CHYBA);
        EEPROM_KONTRAST         = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_KONTRAST);
    }
}

```

```

EEPROM_TEPLOTA1 = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA1);
EEPROM_TEPLOTA2 = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA2);
EEPROM_TEPLOTA3 = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA3);
EEPROM_TEPLOTA4 = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA4);
EEPROM_TEPLOTA5 = eeprom_read_word((uint16_t*)EEPROM_ADDR_TEPLOTA5);

EEPROM_CAS1 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS1);
EEPROM_CAS2 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS2);
EEPROM_CAS3 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS3);
EEPROM_CAS4 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS4);
EEPROM_CAS5 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_CAS5);

EEPROM_TERMTYPE1 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMTYPE1);
EEPROM_TERMTYPE2 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMTYPE2);
EEPROM_TERMMASK1 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMMASK1);
EEPROM_TERMMASK2 = eeprom_read_byte((uint8_t*)EEPROM_ADDR_TERMMASK2);
}
}

```

### 5.2.14 Časování

Časování programu je nesmírně důležité. Je třeba zajistit, aby se určité funkce volaly po definované době, provádělo se měření nebo se pomocí časování generovali definované pulsy na pinech. Jak je vidět na úryvku kódu níže, je zde přítomno časování v přerušení po 0,25 a 1 sekundě. Dále je zde přerušení od časovače zajišťující délku písknutí bzučáku. Po 0,25 s se nastavuje flag umožňující vykreslování grafu, aktualizuje je parametr zapnutí podsvícení a také se nastavuje flag umožňující volání měření teploty a regulace topného tělesa. Po 1 s se měří frekvence průchodu nulou a otáčky ventilátoru. Dále se aktualizují proměnné zajišťující počítání vteřin, což je podstatné zejména pro funkce pájení a sušení. V neposlední řadě se tu resetuje watchdog a nastavuje se flag chyby ventilátoru, pomocí kterého se diagnostikuje chyba roztočení.

```

//PRERUSENI OD RTC_PIT PERIODA = 0,25s
ISR(RTC_PIT_vect)
{
    RTC_PITINTFLAGS = 1;
//Timer pravidelne preruseni kde se nacistaji nove hodnoty z eeprom, bliká led pokud se paji
atd...
    readEEPROM();
    //Podlsvetlenni zap vyp v preruseni
    if(Diagnostika_flag == 0)
    {
        if (EEPROM_LCD_BL)
        {
            PORTA_OUTSET = 0b0000100;
        }
        else
        {
            PORTA_OUTCLR = 0b0000100;
        }
    }
    //priznak ze se muze udelat dalsi zmereni teploty a regulacni zasah
    ZmerARegulace_flag = 1;

    DRAW_GRAF_flag = 1;
}
//PRERUSENI OD BZUCAKU
ISR(TCB0_INT_vect)
{
    TCB0_INTFLAGS = 1;

    if (BEEP_opakovani)
    {
        BEEP_opakovani--;
    }
    else
    {
        //Vypnout bzucak
    }
}

```

```

        PORTA_OUTCLR = 0b00000010;
        TCB0_CTRLA = 0;
    }
}
//PRERUSENI OD RTC PERIODA 1s
ISR(RTC_CNT_vect)
{
    RTC_INTFLAGS = 1;
    VENT_CHYBA_flag = 1;
    //DRAW_GRAF_flag = 1;
    ZCD_FREKVENCE = ZCD_POCITANI;
    VENT_FREKVENCE = VENT_POCITANI;
    ZCD_POCITANI = 0;
    VENT_POCITANI = 0;
    if (CAS_Pajeni != 0)
    {
        CAS_Pajeni--;
    }
    POCITADLO_VTERINY++;
    //OBNOVENI WDT
    wdt_reset();
}

```

### 5.2.15 Sériové číslo

Ukázka výpisu sériového čísla zde bude sloužit pro znázornění, jakým způsobem jsou psány konečné funkce v podmenu. Vždy se jedná o nekonečnou smyčku, která něco nastavuje nebo vypisuje na displej. Níže je krátký úryvek kódu, kde lze vidět algoritmus opuštění smyčky po stisku tlačítka. Takový způsob programování je možný pouze proto, že veškeré obslužné části jsou volány a zpracovávány v přerušeních. Proto zde nekonečná smyčka neznamená zastavení mikroprocesoru nebo vyřazení z provozu důležitých částí.

```

void FCE_Diagnostika_Info_SerioveCislo(void){
    uint8_t smycka = 1;
    memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
    do
    {
        LCD_DrawString("Seriove cislo:",0, 0);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM0 , 2, 0, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM1 , 2, 12, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM2 , 2, 24, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM3 , 2, 36, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM4 , 2, 48, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM5 , 2, 60, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM6 , 2, 72, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM7 , 2, 84, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM8 , 2, 96, 2);
        LCD_DrawNumberFixed((uint16_t)SIGROW_SERNUM9 , 2, 108, 2);
        LCD_DrawString(">Zpet", 4, 0);
        LCD_UpdateScreen();
        if (TL_stisk)
        {
            TL_stisk = 0;
            smycka = 0;
        }
    } while (smycka);
    memset(lcd_buffer, 0x00, sizeof(lcd_buffer));
}

```

### 5.2.16 Graf pájení

Ve funkci pájení je přítomno volání funkce, která je k vidění níže. Dochází zde k vykreslování aktuálních parametrů pájení na displej. Jedná se o aktuální teplotu, zadanou teplotu, cílovou teplotu, číslo fáze a zbývající čas. Dalšími prvky jsou rotující přímka pro znázornění spuštěného pájení a bargraf, který představuje aktuální výkon topného tělesa. Hlavním prvkem však je vykreslování aktuální teploty do grafu v závislosti na aktuálním

čase. Tím se na displeji tvoří graf průběhu skutečného pájecího profilu. Obsluha tak může vidět, jestli pájení probíhá v pořádku a jestli je skutečný teplotní průběh správný.

```
//Vykreslovani grafu na displej
void DRAW_GRAF(uint16_t teplota_zadana, uint16_t teplota_aktualni, uint16_t teplota_cilova,
uint8_t cas_zbyvajici, uint16_t cas_aktualni_celkovy, uint8_t cislo_faze){

    LCD_DrawLine(12, 0, 12, 54);
    LCD_DrawLine(12, 54, 127, 54);
    LCD_DrawString("t:", 1, 0);
    LCD_DrawString(" ", 2, 0);
    LCD_DrawNumber((uint16_t) cas_zbyvajici, 2, 0);
    LCD_DrawChar('s', 3, 0);
    LCD_DrawChar('F', 0, 0);
    LCD_DrawString(" ", 0, 6);
    LCD_DrawNumber((uint16_t) cislo_faze, 0, 6);
    LCD_DrawString("Tm", 7, 0); //jako teplota měřená
    LCD_DrawString(" ", 7, 12);
    LCD_DrawNumber(teplota_aktualni, 7, 12);
    LCD_DrawString("Tr", 7, 34); //jako teplota regulační
    LCD_DrawString(" ", 7, 46);
    LCD_DrawNumber(teplota_zadana, 7, 46);
    LCD_DrawString("Tc", 7, 68); //jako teplota cílová
    LCD_DrawString(" ", 7, 80);
    LCD_DrawNumber(teplota_cilova, 7, 80);
    LCD_DrawChar('[', 7, 102);
    LCD_DrawChar(0, 7, 108);
    LCD_DrawChar('C', 7, 114);
    LCD_DrawChar(']', 7, 120);

    //vykreslovani pixelů podle teploty_aktualni a casu_celkoveho
    if ((poradi_pixelu/0.255) < cas_aktualni_celkovy)
    {
        poradi_pixelu++;
    }
    LCD_DrawPixel((uint8_t) (poradi_pixelu) + 12, (uint8_t) (54 -
(0.154*teplota_aktualni)));
    LCD_DrawChar(' ', 4, 4);
        //animace bezici kolecko
    LCD_DrawString(" ", 4, 0);
    switch (pocitadlo)
    {
        case 0:
            LCD_DrawLine(0, 35, 6, 35);
            break;

        case 1:
            LCD_DrawLine(0, 34, 6, 36);
            break;
        .
        .
        .
        case 7:
            LCD_DrawLine(6, 34, 0, 36);
            break;
    }
    if (pocitadlo == 7)
    {
        pocitadlo = 0;
    }
    else
    {
        pocitadlo++;
    }
    //bargraf vykonu telesa
    LCD_DrawString(" ", 5, 0);
    LCD_DrawString(" ", 6, 0);
    LCD_DrawChar(' ', 5, 4);
    LCD_DrawChar(' ', 6, 4);

    if (HEAT_DUT >= (1*HEAT_DUT_VAL/16))
    {
        LCD_DrawLine( 0, 54, 10, 54);
    }
}
```

```

if (HEAT_DUT >= (2*HEAT_DUT_VAL/16))
{
    LCD_DrawLine( 0, 53, 10, 53);
}
.
.
if (HEAT_DUT >= (15*HEAT_DUT_VAL/16))
{
    LCD_DrawLine( 0, 40, 10, 40);
}

LCD_UpdateScreen();
return;
}

```

### 5.2.17 Ostatní a pomocné funkce

Program obsahuje velké množství funkcí, přičemž kompletní popisování by tuto práci příliš prodlužovalo. V tabulce 9 jsou všechny zbývající nepopsané funkce vypsány a je k nim dodán základní popis, k čemu slouží. Často se jedná o pomocné funkce, které posílají nebo čtou data, generují čísla či text na displej nebo zajišťují inicializaci. Jsou tu také grafické nástroje pro vykreslování čar či pixelů na LCD. Funkce spojené s displejem nebo s prací s bajty či čísly jsou často inspirovány z veřejně publikovaných knihoven. Algoritmické zpracování se totiž výrazně neliší mezi typy displejů, a tak lze s malými úpravami převzít potřebné kousky kódu. Dalším pomocným nástrojem pro programování je v současné době generativní umělá inteligence, pomocí které byla vytvořena například funkce převodu čísla na jeho binární podobu v desítkové soustavě. Tato úloha je totiž snadno popsatelná, avšak při navrhování od základu zdlouhavá na vývoj. Díky umělé inteligenci byl proces vytváření této funkce mnohem rychlejší.

**Tabulka 9 - Ostatní a pomocné funkce**

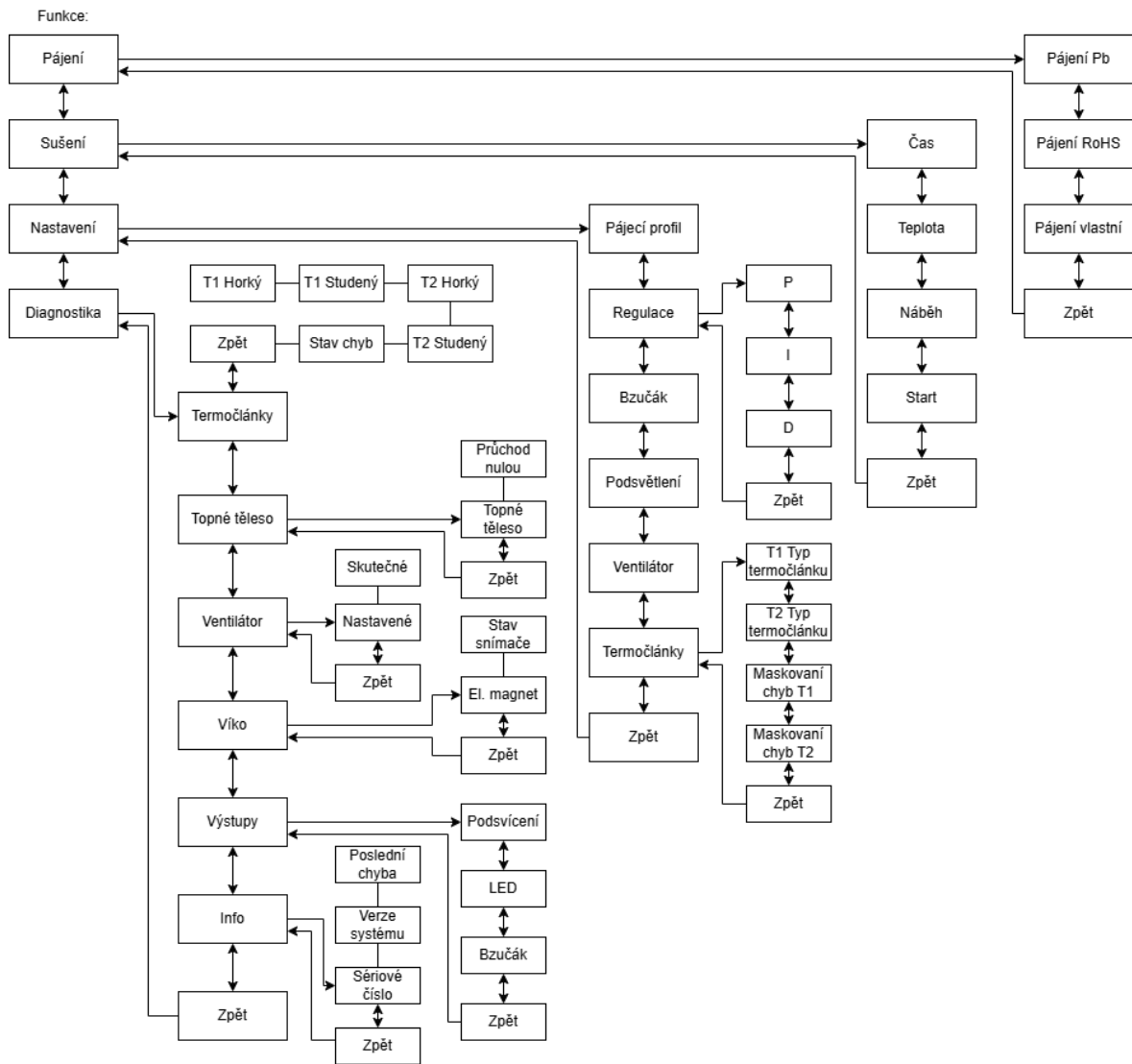
Název funkce	Popis
uint8_t SPI_transfer(uint8_t data)	Přenos přes SPI.
void MAX31856_1_writeRegister(uint8_t reg, uint8_t value)	Zapsání do registru prvního převodníku.
void MAX31856_2_writeRegister(uint8_t reg, uint8_t value)	Zapsání do registru druhého převodníku.
uint8_t MAX31856_1_readRegister(uint8_t reg)	Čtení registru z prvního převodníku.
uint8_t MAX31856_2_readRegister(uint8_t reg)	Čtení registru z druhého převodníku.
void TEMP_INIT(void)	Inicializace převodníků termočlánků.
uint16_t binarniNaDesitkove(uint16_t cislo)	Převod binárního čísla na odpovídající sekvenci jedniček a nul v desítkové soustavě.
void NastaveniKontrastu(void)	Nastavení kontrastu.
void BZUCAK_BEEP()	Písknutí bzučáku.
void LCD_SEND_COMM(uint8_t comm)	Poslání příkazu na displej.
void PORT_INIT(void)	Inicializace portů mikroprocesoru.
void LCD_INIT(void)	Inicializace displeje.

<code>void LCD_UpdateScreen(void)</code>	Nahrání bufferu do RAM displeje.
<code>void LCD_DrawChar(char c, uint8_t row, uint8_t col)</code>	Vykreslení znaku na displej.
<code>uint8_t reverseByte(uint8_t b)</code>	Otočení pořadí bitů v bajtu.
<code>void LCD_DrawString(const char *str, uint8_t row, uint8_t col)</code>	Vykreslení řetězce na displej.
<code>void LCD_DrawPixel(uint8_t x, uint8_t y)</code>	Aktivování konkrétního pixelu na displeji.
<code>void LCD_DrawLine(uint8_t x1, uint8_t y1, uint8_t x2, uint8_t y2)</code>	Vykreslení přímky mezi body na displej.
<code>void LCD_DrawNumber(uint16_t cislo, uint8_t row, uint8_t col)</code>	Vykreslení čísla na displej.
<code>void LCD_DrawNumberFixed(uint16_t cislo, uint8_t row, uint8_t col, uint8_t minWidth)</code>	Vykreslení čísel na displej ve formátu fixní délky doplněné nulami.

Dekompozice programu do funkcí napomáhá přehlednosti. Dále je také výhodné neopakovat kusy kódu, které se provádějí na více místech, ale místo toho pouze zavolat funkci. Dobrým zvykem je psaní funkcí tak, aby nebyly závislé na jiných parametrech, než které se předávají při volání. Toho však nelze vždy dosáhnout, a tak i v tomto programu jsou místa, kde například funkce musí pracovat s globální proměnnou nebo proměnnou, která je obsluhována v přerušení. Nejdůležitější ukazatel však je funkčnost programu, která je v tomto případě stoprocentní a jsou zde ošetřeny téměř všechny okrajové podmínky, které mohou nastat.

### 5.3 Schéma menu

Na obrázku 53 níže je vyobrazeno blokové schéma úrovní a podúrovní menu pájecí pece. Pohyb v menu se provádí rotačním enkodérem a středovým spínačem. Pro indikaci aktuálně vybrané položky je na displeji zobrazován symbol >.

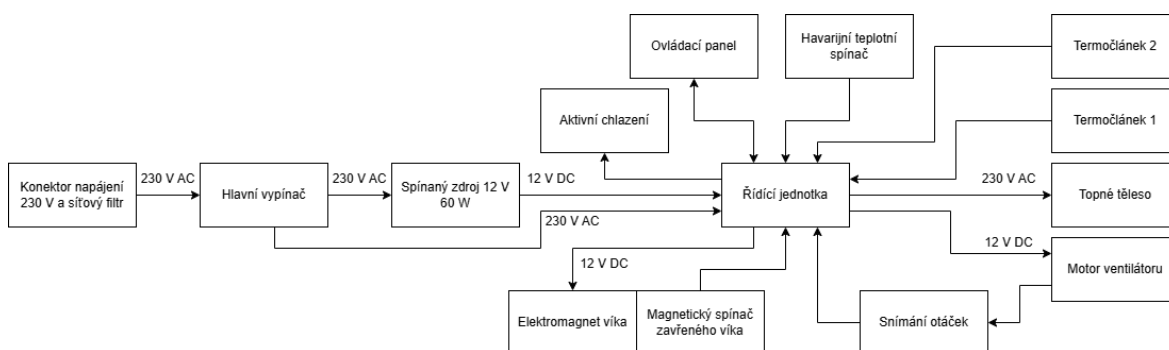


Obrázek 53 - Blokové schéma menu

## 6 Kompletace zařízení

### 6.1 Sestavení

Uvedený stroj lze rozdělit na tři hlavní dílčí části, a to mechanickou konstrukci, elektrické zapojení a program. Všem těmto částem byly věnovány předchozí kapitoly. Zde bude popsáno celkové zkompletování těchto dílčích částí do jednoho celku. Na obrázku 54 je blokové schéma propojení jednotlivých elektrických částí pájecí pece. Při kompletaci je nutné propojovací cesty správně zapojit. Díky použitým konektorům je předpoklad pro snadnou montáž i demontáž při přípravné opravě.



Obrázek 54 - Schéma zapojení pájecí pece

Skládání pájecí pece začalo montáží plechových dílců vnějšího obalu a přepážky. Následovalo ustavení kluzných ložisek do osy a připevnění rukojeti do víka pece. V tuto chvíli mohlo být přistoupeno k nařezání správných rozměrů izolace a vložení izolačního materiálu do prostoru pece. Izolační materiál byl vložen také do víka, kde byl následně zajištěn ochranným plechem. Po smontování vnitřní nerezové komory byla tato vložena do izolace a zajištěna pomocí šroubů, a to vespod a na boku pájecí pece. Při tomto kroku byly také přidělané nohy zařízení. Následně mohlo být víko připevněno ke zbytku zařízení pomocí pantů a do pájecí komory přišlo vložit topné těleso. Skrz pájecí komoru vede hřídel ventilátoru a na ní je samotný ventilátor připevněný. Po usazení mřížky do komory byla první část skládání hotová.

Ve druhé části skládání pece přišla řada na vložení elektroniky. Hlavní řídicí deska byla usazena na distanční sloupky do předem připravených otvorů. Do plechu ovládacího panelu byla přidělaná deska s displejem a ovládacím prvkem, na který přišlo nasadit otočný volič. Následoval zdroj, elektromotor a spojka hřídelí s přerušovacím kotoučkem. Připevněn byl i ventilátor a vstup napájení společně s hlavním vypínačem. Po úpravě snímače otáček motoru a snímače zavřeného víka mohly být oba připevněny na příslušné držáky. Termočláanky šlo následně vsunout do pájecí komory přes ochranné průchodky a připojit na desku. Nutností se stalo vytvoření záchytných špuntů pro pružiny, které mohly být následně přidělané společně s elektromagnety do ovládacího panelu. V prostoru pro elektroniku nyní chyběl jen zdroj stejnosměrného napětí, který našel své místo na hliníkovém držáku v pravé zadní části. Před finálním uzavřením byl ještě nahrán nejaktuálnější firmware a pro zlepšení přehlednosti byly vodiče svázané stahovacími páskami a samolepicími kabelovými oky.

Po usazení čelního panelu je nyní pájecí pec připravena k bezpečnému a spolehlivému provozu. Fotodokumentace ze skládání pájecí pece se nachází na obrázcích 55 a 56.



**Obrázek 55 - Skládání pece**



**Obrázek 56 - Finalizace skládání**

Fotodokumentace finální podoby pájecí pece je v příloze E.

## 6.2 Měření

V této kapitole se provádělo měření na zkonstruované pájecí peci. Parametry jsou vypsány také v návodu k obsluze. Bylo provedeno také měření reálných průběhů teplot při provozu pece.

### 6.2.1 Parametry pece

Pro shrnutí vlastností pájecí pece byla vytvořena přehledná tabulka s klíčovými parametry. Jsou zde informace o elektrickém připojení a okolních pracovních podmínkách. Dále jsou v tabulce přítomny údaje o fyzických proporcích jako je hmotnost, rozměr či materiál. Nechybí ani několik údajů o schopnostech pece a o programovém vybavení. Díky této tabulce může být kdokoli během pár minut seznámen s funkcí, schopnostmi a proporcemi pájecí pece. Všechny důležité parametry jsou vepsány do tabulky 10.

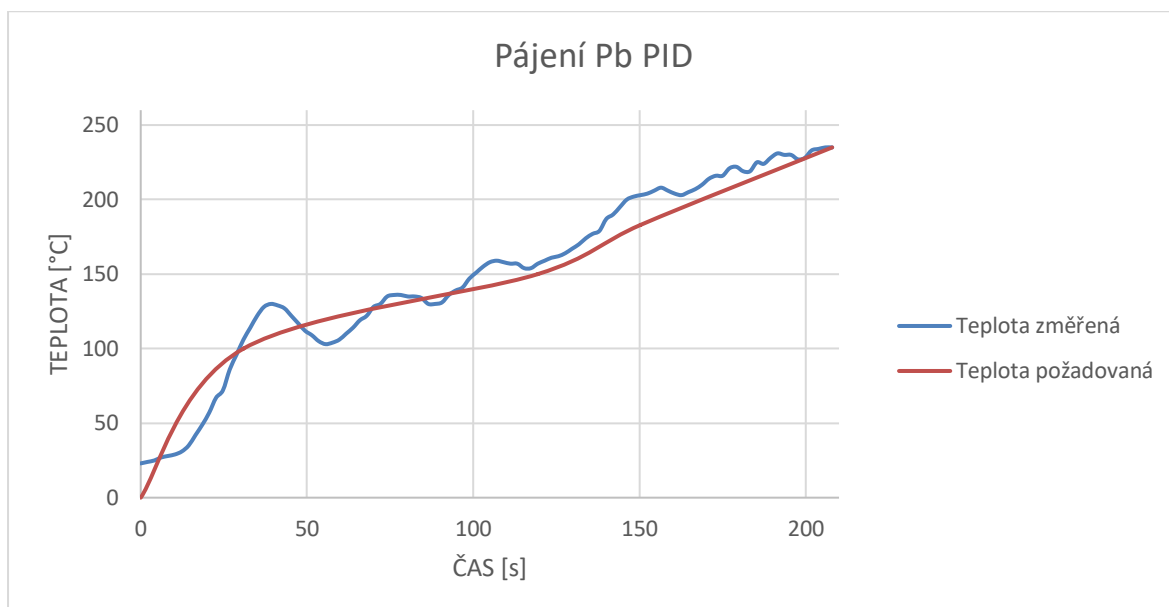
Tabulka 10 - Parametry pájecí pece

Maximální teplota pece	350 °C
Typ pecní komory	S vrchním plněním
Napájení	230 V AC $\pm 10\%$ ; 50 Hz
Příkon	1800 W
Rozměry (h x š x v)	422 x 186 x 241 mm
Hmotnost	12,2 kg
Pracovní teplota	0 °C až 35 °C
Pracovní vlhkost	10–90 % Rh
Maximální velikost DPS	210 x 110 mm
Materiál krytu	Lakovaná ocel
Materiál pájecí komory	Nerez
Třída ochrany	1
IP krytí	IP20
Typ regulace	PID/ON-OFF
Funkce	Pájení, sušení
Maximální doba sušení	16 h
Počet fází pájení	5
Maximální čas každé fáze pájení	90 s
Způsob chlazení	Pasivně přes automaticky otevřené víko
Ovládání	Rotační enkodér a grafický displej
Další funkce	Nastavení, diagnostika, automatická detekce chyb

### 6.2.2 Teploty a následování pájecího průběhu

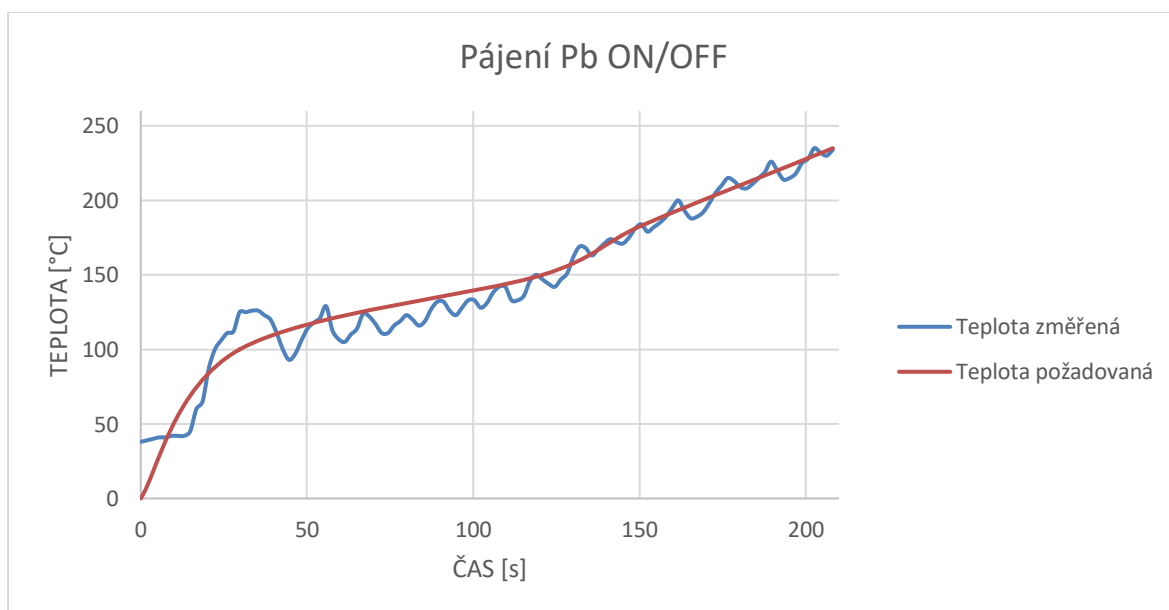
Pro ověření funkce byl změřen teplotní průběh pájení a byl vytvořen přehledný graf, který ukazuje, do jaké míry je následování teploty přesné. V první části byla nastavena regulace typu PID, která prošla několika testovacími cykly pro optimální nastavení koeficientů. Ventilátor byl pro všechna měření nastaven na 1500 otáček za minutu. Jako vzor je vybrán pájecí profil pro olovnatou pájku. Na obrázku 57 je graf reálného pájecího průběhu teplot

v porovnání s ideálním průběhem při spuštění PID regulaci. Fotografie displeje s vykresleným grafem jsou v příloze E.



**Obrázek 57 - Graf teplotního průběhu pro pájení Pb s PID regulací**

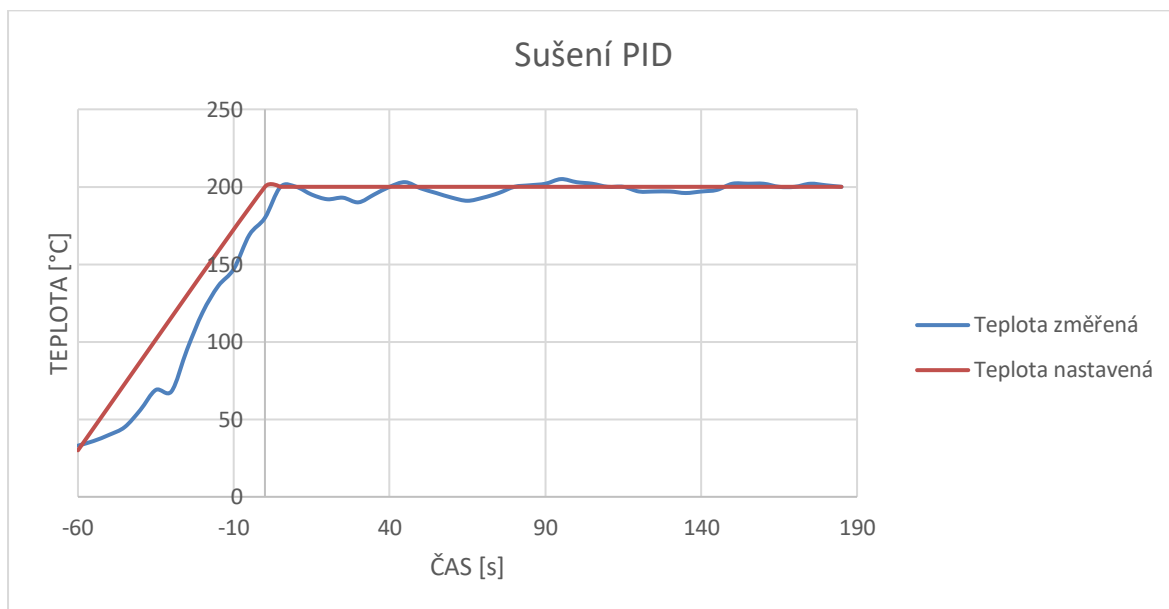
Jak lze vidět, regulace má určitý překmit, který by se ovšem dal odstranit preciznějším nastavením koeficientů regulace. Po tomto měření došlo k přenastavení regulace na typ ON/OFF. Lze očekávat, že reálná teplota bude oscilovat okolo ideálního průběhu, ovšem jen v malých mezích, protože v soustavě je velmi malé dopravní zpoždění. Na obrázku 58 je graf reálného pájecího průběhu teplot v porovnání s ideálním průběhem při spuštění ON/OFF regulaci. Teplota skutečně kmitá, ovšem v malém rozmezí. I tato regulace splňuje očekávání.



**Obrázek 58 - Graf teplotního průběhu pro pájení Pb s ON/OFF regulací**

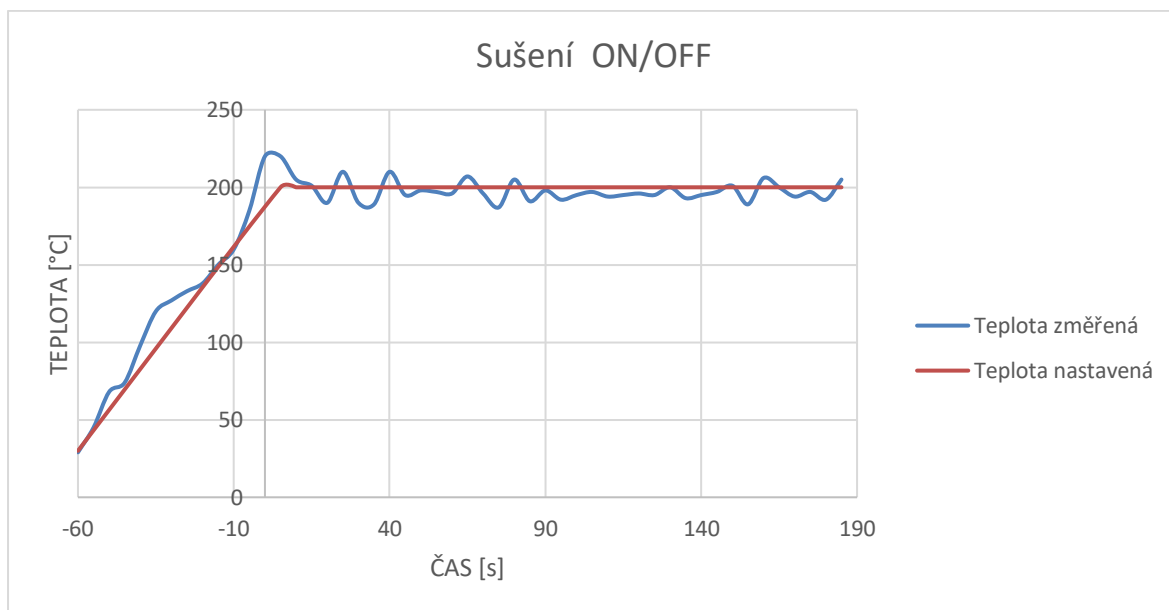
### 6.2.3 Teploty při funkci sušení

Důležité je ověřit i doplňkovou funkci sušení. Zde je kritické, aby teplota nekolísala od žádané hodnoty v dlouhodobém časovém měřítku. Opět byly vytvořeny dva grafy, a to pro PID a ON/OFF regulaci. Ventilátor je nastaven stále na 1500 otáček za minutu, protože se tato hodnota ukázala jako vhodná. Na obrázku 59 je graf reálného průběhu teplot sušení při spuštění PID regulaci.



Obrázek 59 - Graf teplotního průběhu pro sušení s PID regulací

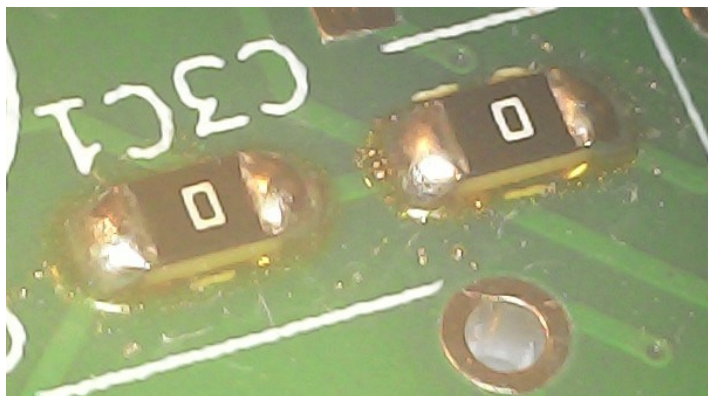
Při použití ON/OFF regulace bude teplota kolísat kolem nastavené hodnoty, ale stejně jako v případě pájení by kolísání mělo být malé a nemělo by výrazně ovlivnit proces. Na obrázku 60 je graf reálného průběhu teplot sušení při spuštění ON/OFF regulaci.



Obrázek 60 - Graf teplotního profilu pro sušení s ON/OFF regulací

### 6.3 Test funkce

Pro ověření správného fungování pájecí pece byl proveden test na reálných DPS, což je ostatně i součástí zadání této bakalářské práce. Pro testování byla zvolena deska plošných spojů, která obsahuje základní součástky různě rozmístěné po ploše a byl spuštěn pájecí profil odpovídající typu pájecí pasty. Pro ukončení pájení byla kvalita pájených spojů ověřena pohledově pod mikroskopem, mechanicky nástrojem i elektricky pomocí laboratorního zdroje a multimetru. Výsledek pájené DPS lze vidět na obrázku 61.



Obrázek 61 - Test pájení

Jak si lze povšimnout, pájené spoje jsou velmi kvalitně provedeny. Procesem přetavení prošla veškerá místa a elektrickým testem bylo zjištěno, že všechny součástky jsou plně funkční a pájení je nepoškodilo. Zkouškou mechanickým nástrojem se potvrdilo, že pájené spoje jsou pevné, protože se nepodařilo přiměřenou silou žádnou součástku odtrhnout. Stejného výsledku bylo dosaženo i při dalších dvou testech. S radostí tak lze konstatovat, že pájecí pec je plně funkční a spolehlivá.

### 6.4 Návod k obsluze

Jelikož vytvořená pájecí pec obsahuje i složitější možnosti nastavování a ovládání, bylo přistoupeno ke kroku vytvoření návodu k obsluze. V této příručce lze najít informace nejen o tom, jak pec obsluhovat, ale také třeba o tom, jak zajistit bezpečný a spolehlivý provoz, dlouhou životnost, nebo jak postupovat v případě hlášených chyb. Nechybí ani popis technických specifikací a ostatní informace a údaje, které by měl každý manuál obsahovat. Při vytváření tohoto manuálu bylo využito inspirace z běžných příruček domácích spotřebičů a formální aspekt byl vytvořen za pomoci umělé inteligence ChatGPT. Díky manuálu bude bezproblémové obsluhovat pájecí pec i pro osobu neznalou této bakalářské práce. Návod k obsluze se svým formátováním nehodí pro vložení do bakalářské práce jako text, a tak jsou jednotlivé stránky vloženy do přílohy s pořadím F.

## Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala kompletním návrhem komplexního zařízení na pájení desek plošných spojů metodou přetavení pájecí pasty v peci.

V teoretické přípravě jsou nejprve zpracovány různé možnosti ohřevu. Je zde popsáno vedení, proudění i sálání tepla. Jednotlivé způsoby ohřevu jsou náležitě porovnávány, což je důležité pro správnou volbu typu ohřevu v praktické realizaci. Nechybí ani ucelený přehled celého procesu výroby desky plošných spojů, kam patří různé kroky od nanášení pájecí pasty až po čištění, či lakování. Nedílnou součástí pájení metodou přetavením jsou pájecí pasty, a tak i jim bylo věnováno několik odstavců. Typ pájecí pasty navíc definuje potřebnou rychlost ohřevu i maximální teplotu. Následující kapitola se věnuje popisu problematiky měření teploty v pecních systémech a převodu analogové hodnoty z teplotních čidel na digitální číslo, které může zpracovat například mikroprocesor. S tím souvisí i realizace regulace. V základu lze navrhnout dva typy regulace, a to dvoupolohovou a PID.

V praktické části byla zvolena cesta naprogramování obou typů. Jelikož topné těleso musí být regulátorem řízeno, věnuje se poslední část této kapitoly problematice řízení výkonových topných prvků. V pořadí třetí kapitola konečně zpracovává základní konstrukční metody a jsou zde porovnávány jednotlivé materiály, jako například izolační či konstrukční. Pro znázornění současného stavu trhu s podobnými přístroji jsou v této práci předvedeny dva typy pájecích pecí. Pro výrobu funkčního a spolehlivého zařízení je třeba nastudovat také problematiku elektromagnetické kompatibility, které je v této práci věnována část teoretické rešerše. Čtvrtou kapitolou začíná konstrukce vlastního zařízení. Nejprve je vydefinováno, že pájecí pec bude mít topné těleso realizované odporovým drátem a ohřev bude prováděn prouděním. Pro vyšší rovnoměrnost ohřevu je navržen uvnitř pájecí komory ventilátor. Styl pece byl vybrán s horní vsázkou, a tudíž jsou desky plošných spojů vkládány přes odklápací víko. Rozhraní mezi obsluhou a strojem je jednoduché, ale velmi efektivní. Jedná se o grafický LCD doplněný o LED a rotační enkodér s tlačítkem. Díky tomuto ovládacímu prvku je velmi snadné a intuitivní pec ovládat a obsluhovat. Kapitola realizace HW dále popisuje vývoj veškerých důležitých částí obvodu jak řídicí desky, tak i rozhraní člověk stroj. Velký důraz byl kladen na výběr mikroprocesoru, a v důsledku toho tak program může mít i pokročilé funkce, které se u běžně dostupných pájecích pecí nevyskytují. Všechny kritické parametry jako výkon topného tělesa či tloušťka izolace jsou pečlivě napočítány za pomoci odborné literatury. Pec díky tomu spolehlivě fungovala na první spuštění a nebylo třeba provádět žádné iterace. Vnější plášť byl nakreslen v edukační verzi Autodesk Fusion a vygenerovaná výrobní data zpracovala odborná firma. Ta vyřezala a naohýbala plechy z běžné a nerezové oceli, a díky tomu vnější plášť pece vypadá profesionálně a dokonale plní svůj účel. Zařízení je zcela bezpečné a domnívám se, že při zaslání zařízení do zkušebních laboratoří by dostalo i certifikát opravňující k prodeji na trhu.

Předposlední významná kapitola poskytuje přehled nejdůležitějších částí programu. Ten je napsán v programovacím jazyce C. Ke každému kusu kódu patří detailní vysvětlení funkce, a díky tomu je porozumění celkovému programu snazší. Celý program je umístěn v příloze

této práce. Mezi důležité části patří například inicializace, hlavní menu, regulace, funkce pájení, snímání teploty, hlídání chyb nebo práce s EEPROM.

Poslední kapitolou se návrh a výroba zařízení uzavírá měřením. Změřeny jsou jak fyzické parametry, tak i elektrické vlastnosti. Důležité je hlavně přesné následování teplotní křivky pájecí pasty. Po optimálním nastavení parametrů pece byl spuštěn testovací proces na reálné desce plošných spojů. Výsledkem tohoto procesu jsou dokonale zapájené součástky. Pájecí pec tak splnila hlavní požadavek na kvalitu pájení. Troufám si říct, že jako produkt by byla tato pájecí pec velmi dobře konkurenceschopná.

Na závěr byl také vytvořen podrobný návod k obsluze, protože pájecí pec má opravdu mnoho funkcí a je vhodné mít dokument, kde bude obsluha zařízení podrobně popsána. Celý návod k obsluze je obsažen v příloze této práce.

## Literatura

- [1] ŠANDERA, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-181-0.
- [2] RUŽA, Viliam. *Pájení*. 2. vyd., upr. a dopl. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] CAMBRIDGE SENSOTEC. Inert Gas Blanketing in Solder Reflow Ovens. In: CAMBRIDGE SENSOTEC. *Cambridge Sensotec* [online]. 2000 [cit. 2024-12-12]. Dostupné z: <https://cambridge-sensotec.co.uk/blog/inert-gas-blanketing-solder-reflow-ovens/>
- [4] JLCPCB. How to Choose a SMT Stencil. In: *JLCPCB* [online]. 2024, 30.1. 2024 [cit. 2024-12-01]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/blog/how-to-choose-a-smt-stencil>
- [5] SURFACE MOUNT PROCESS: COMPONENT PLACEMENT PROCESS. In: GOOGLE. *SURFACE MOUNT PROCESS* [online]. 2015 [cit. 2024-12-30]. Dostupné z: <https://www.surfacemountprocess.com/component-placement-process.html>
- [6] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [7] JHDPCB. Wave and Reflow Soldering in PCB Soldering: Process Guide. In: JHDPCB. *JHDPCB* [online]. 2023 [cit. 2024-12-30]. Dostupné z: <https://jhdpcb.com/blog/wave-and-reflow-soldering/>
- [8] AIT ADMIN. UV and Conformal Coatings. In: AI TECHNOLOGY, INC. *AiT* [online]. 2020, 31. 1. 2020, 2020 [cit. 2025-01-02]. Dostupné z: <https://www.aitechnology.com/uv-and-conformal-coatings/>
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Část 5, Moderní fyzika. 6. vydání. Přeložil Bohumila LENCOVÁ, přeložil Jan OBDRŽÁLEK, přeložil Petr DUB. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic, sv. 1. ISBN 80-214-1868-0.
- [10] TULKA, Jiří a Slavomír PIRKL. *Termika: (učební text pro předmět Fyzika I)*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2002. ISBN 80-7194-429-7.
- [11] NOŽIČKA, Jiří. *Termomechanika*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-1836-9.

- [12] SOLVAY. Galden LS and HS: Vapor Phase Soldering Fluids. In: SOLVAY. *SOLVAY* [online]. 2022, 2022 [cit. 2024-12-12]. Dostupné z: <https://content.solvay.com/galden-ls/hs-vapor-phase-soldering-fluids>
- [13] PAN, Alex. What is PCB Tombstone? In: *PCBPit* [online]. 2023, 28.12. 2023, 17.11. 2023 [cit. 2024-12-01]. Dostupné z: <https://pcbpit.com/what-is-pcb-tombstone/>
- [14] The impact of childhood lead exposure on adult personality: Evidence from the United States, Europe, and a large-scale natural experiment. *PNAS* [online]. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., 2021, 12. 7. 2021, 2024, **118**(29) [cit. 2024-12-07]. ISSN 1091-6490. 118 (29) e2020104118. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1073/pnas.2020104118](https://doi.org/10.1073/pnas.2020104118)
- [15] EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2011/65/EU ze dne 8. června 2011 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních* [online]. Druhé přepracované vydání. Evropská Unie, 2011 [cit. 2024-12-07]. L 174/88. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj>
- [16] CHIPQUIK.COM. [HTTPS://WWW.CHIPQUIK.COM/](https://www.chipquik.com/). *SMD291AX10: Solder Paste No-Clean Sn63/Pb37 in 10cc Syringe 35g T3 Mesh* [online]. 2022, 2 s. [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/3817078.pdf>
- [17] CHIPQUIK.COM. [CHIPQUIK.COM](https://www.chipquik.com/). *SMD291SNL10: Solder Paste No-Clean SAC305 in 10cc Syringe 35g T3 Mesh* [online]. 2015, 2 s. [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/2003737.pdf>
- [18] DUFF, Matthew a Joseph TOWEY. Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility: Analog Dialogue. In: ANALOG DIALOGUE. *Analog Devices* [online]. 2010, 2010 [cit. 2025-01-07]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/volume-44/number-4/articles/measuring-temp-using-thermocouples.pdf>
- [19] HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [20] YANG, Robin. Sledujeme teplotu v širokém rozsahu. S termočlánky a jejich podpůrnými obvody. In: CADWARE S.R.O. *DPS elektronika od A do Z* [online]. 6/2018, 2025 [cit. 2025-01-08]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:59072/sledujeme-teplotu-v-sirokem-rozsahu-s-termoclanky-a-jejich-podpurnymi-obvody>

- [21] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [22] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. *Elektronické prvky*. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-426-2.
- [23] VEDRAL, Josef a Jakub SVATOŠ. *Zpracování a digitalizace analogových signálů v měřicí technice*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06424-5.
- [24] MACHÁČEK, Jiří. *Pokročilé metody řízení procesů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-937-1.
- [25] ING. NOŽKA, Marek. PSK1-8: Kvantování. In: VOŠ S SPŠE OLOMOUC. *Mamut.spseol.cz* [online]. [cit. 2025-01-11]. Dostupné z: <https://mamut.spseol.cz/nozka/psk/031-quantovani/>
- [26] HUDY, Wiktor, Kazimierz JARACZ a Piotr MIGO. Analysis of a two-position regulation system with correction. *Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis* [online]. 30-084 Kraków, 2017, **10**(251), 30 - 34 [cit. 2025-01-06]. ISSN 2081-5468. Dostupné z: doi:10.24917/20815468.10.3
- [27] X-ENGINEER. On-off control system. In: X-ENGINEER.ORG. *X-engineer* [online]. 2025, 2025 [cit. 2025-01-06]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/on-off-control-system/>
- [28] VÁMOS, Tibor. SYSBOOK: Chapter VIII: Control. In: HUN-REN. *Sysbook.sztaki.hu* [online]. 2017 [cit. 2025-01-19]. Dostupné z: <http://sysbook.sztaki.hu/sysbook6.php?page=97&lang=en&left=theory&right=text>
- [29] CAI, Jiaze. A Fully Mechanical Realization of PID Controller. *Highlights in Science, Engineering and Technology* [online]. Texas A&M University, State of Texas, United States, 2022, **CII**(9), 319-328 [cit. 2025-01-21]. Dostupné z: <file:///C:/Users/burya/Downloads/AFullyMechanicalRealizationofPIDController.pdf>
- [30] WIKIMEDIA COMMONS. File:Pwm 5steps.gif. In: WIKIMEDIA COMMONS. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2022, 2022 [cit. 2024-12-12]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pwm\\_5steps.gif&oldid=629410735](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Pwm_5steps.gif&oldid=629410735)
- [31] FORTEX. RF100 CONVECTION REFLOW OVEN: OPERATING INSTRUCTIONS. In: FORTEX ENGINEERING. *Fortex* [online]. 2021, 5. 7. 2024

- [cit. 2025-01-12]. Dostupné z: <https://www.fortex.co.uk/download/rf100-reflow-oven-manual/>
- [32] JUKI. RS 600; RS 800; RS 1000: Reflow Oven Series. In: PBT ROŽNOV P.R., S.R.O. *PBT* [online]. 1993, 2017 [cit. 2025-01-12]. Dostupné z: <https://www.pbt.cz/getattachment/d9f09012-43fd-426b-815d-fca906681dd8/RS.aspx>
- [33] ING. POKRIVČÁK, Milan. Minerální izolace a její použití. In: ABS. *Architektúra stavebníctvo biznis* [online]. 2009, 17. září 2009, 2009 [cit. 2024-12-12]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zatepleni/mineralni-izolace-a-jeji-pouziti>
- [34] REFAGLASS TRADE, S.R.O. Desky z pěnového skla. REFAGLASS TRADE, S.R.O. *REFAGLASS* [online]. 2019, 2019 [cit. 2024-12-07]. Dostupné z: <https://www.refaglass.cz/desky-z-penoveho-skla/>
- [35] AEROGEL.ORG. What is Aerogel? In: AEROGEL.ORG. *Aerogel* [online]. 2006 [cit. 2025-01-18]. Dostupné z: <https://www.aerogel.org/?p=3>
- [36] BUREŠ, Milan. Tabulka krytí IP: Popis stupňů. In: ELEKTRIKA.INFO S.R.O. *Profi elektrika.cz* [online]. 2003, 18. 9. 2003, 2025 [cit. 2025-01-08]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/krip030918>
- [37] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky*. Brno: Novotný, 2001. ISBN 80-214-1873-7.
- [38] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří HAMMERBAUER. *Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů*. Praha: BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [39] HUSÁK, Miroslav. *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku*. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03398-8.
- [40] MICROCHIP. ATmega4808/4809: ATmega4808/4809 Data Sheet. In: MICROCHIP. *Microchip* [online]. 2018, 2020 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega4808-4809-Data-Sheet-DS40002173A.pdf>
- [41] ANALOG DEVICES. MAX31856: Precision Thermocouple to Digital Converter with Linearization. In: ANALOG DEVICES. *Analog Devices* [online]. 2015, 2015 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31856.pdf>
- [42] NEWHAVEN DISPLAY INTERNATIONAL. NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3: COG Liquid crystal display module. In: NEWHAVEN DISPLAY INTERNATIONAL. *Newhaven display international* [online]. 2010, 2023 [cit. 2025-

02-22]. Dostupné z: <https://newhavendisplay.com/content/specs/NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3.pdf>

- [43] SITRONIX. ST7565R: 65 x 132 Dot Matrix LCD Controller/Driver. In: SITRONIX. *Sitronix* [online]. 2005, 2016 [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: [https://support.newhavendisplay.com/hc/en-us/article\\_attachments/26189026785559](https://support.newhavendisplay.com/hc/en-us/article_attachments/26189026785559)

## **Seznam příloh**

Příloha A – DPS řídicí jednotky

Příloha B – DPS obvodu rozhraní člověk stroj

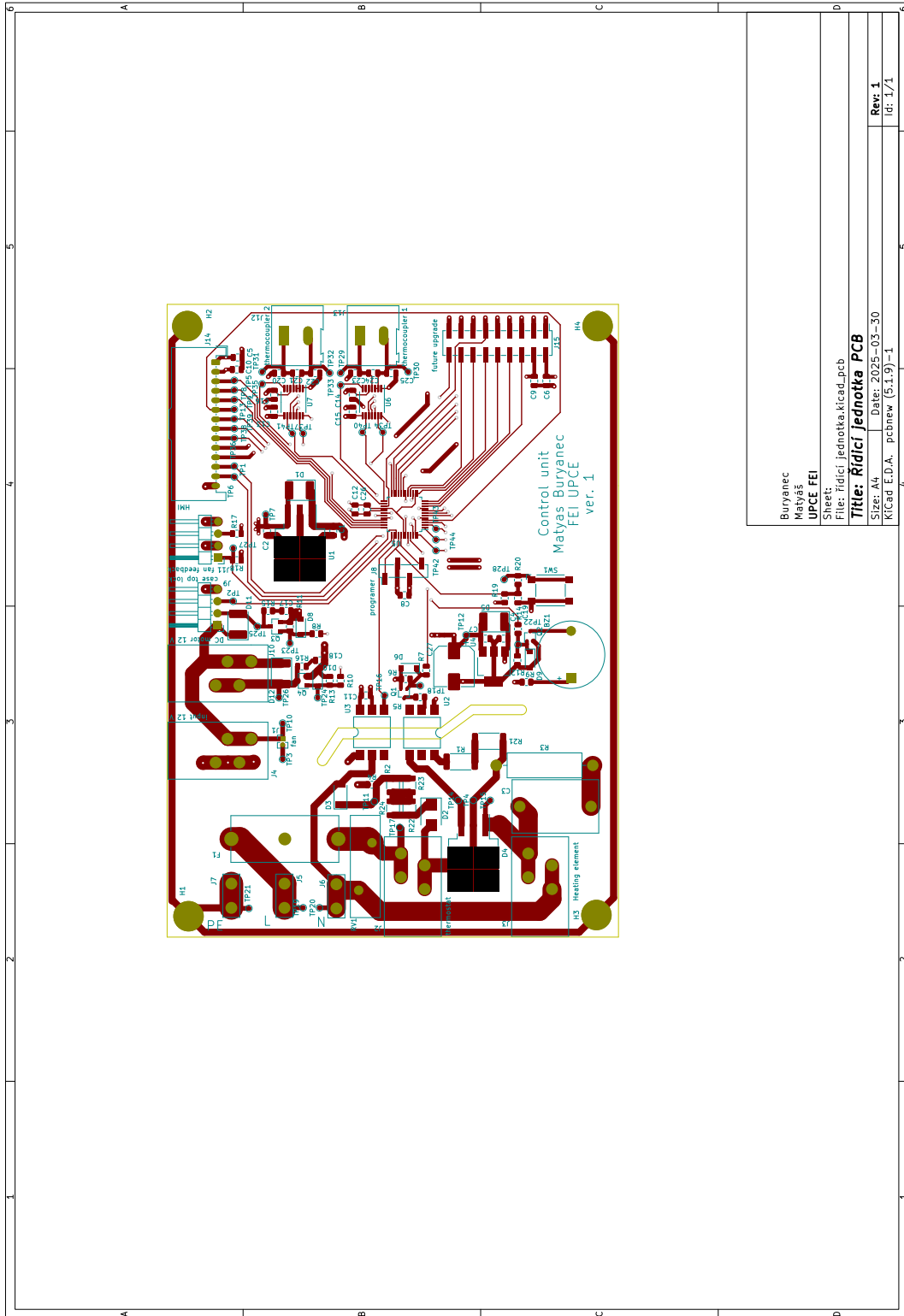
Příloha C – Zdrojový kód

Příloha D – Výkres konstrukce

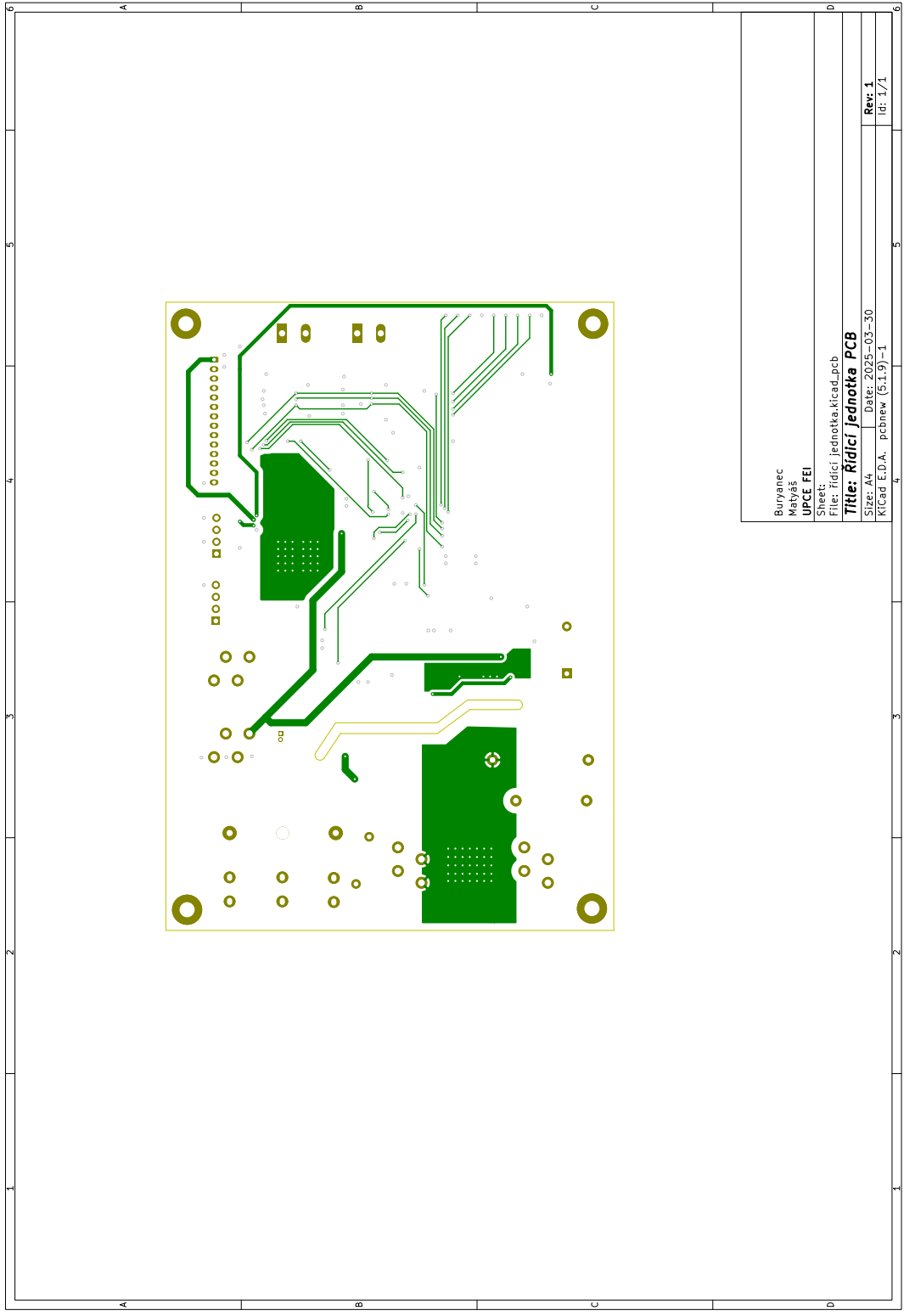
Příloha E – Fotodokumentace

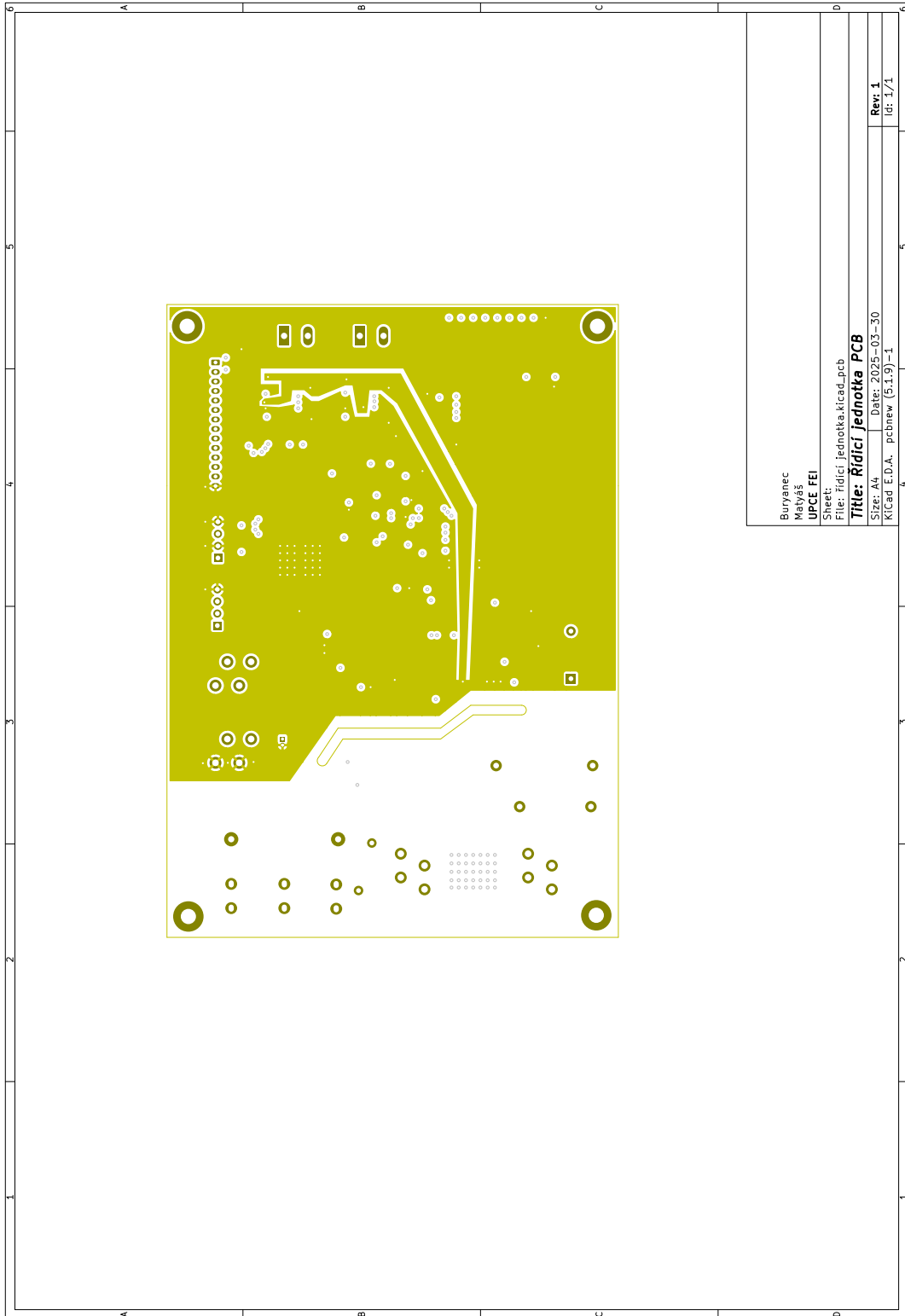
Příloha F – Návod k obsluze

# Příloha A – DPS řídicí jednotky

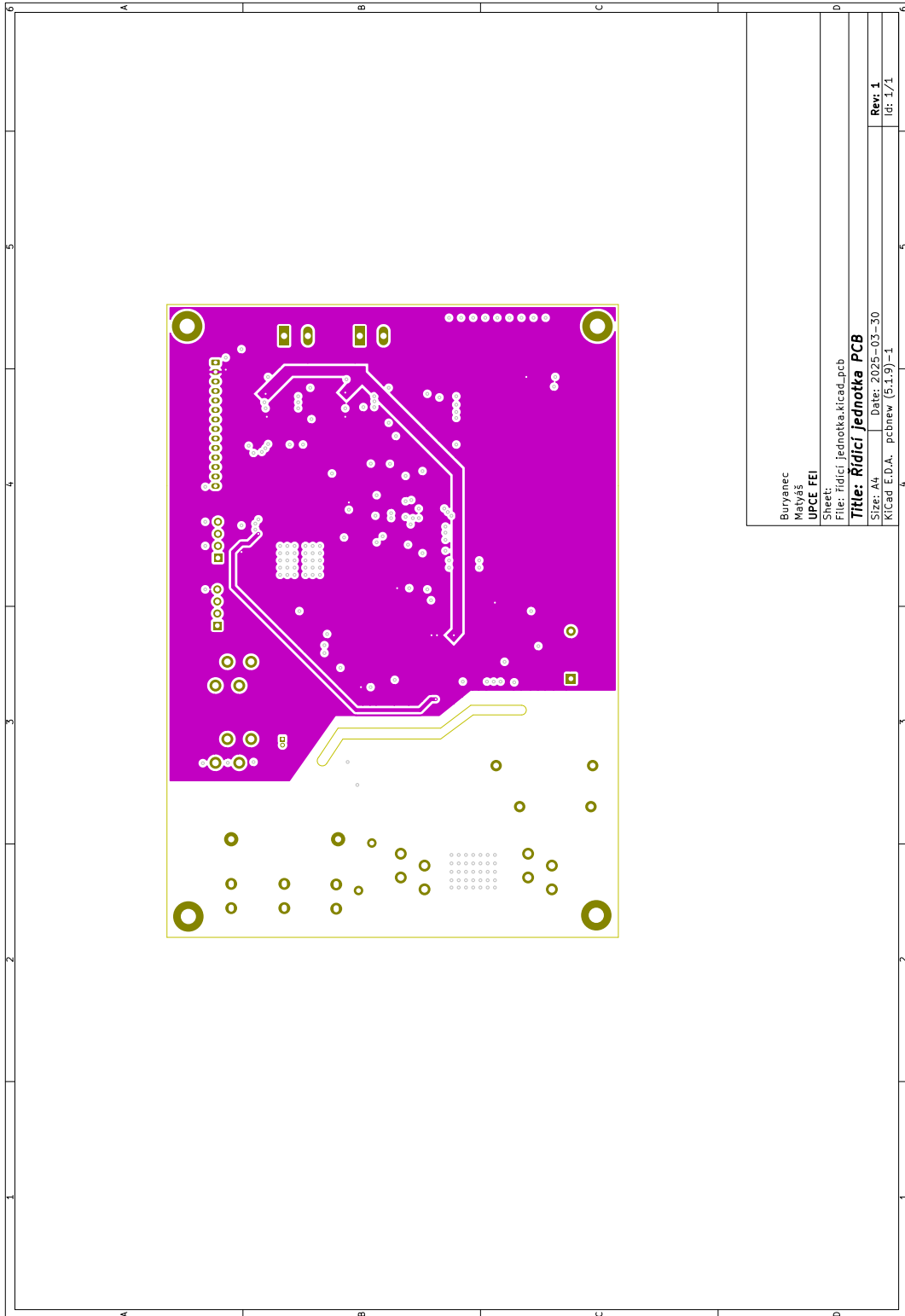


Buryanec
Matyas
UPCE FEI
Sheet:
File: řídicí_jednotka.kicad_pcb
<b>Title: Řídicí jednotka PCB</b>
Size: A4
Date: 2025-03-30
KiCad E.D.A. - pcbnew (5.1.9)-1
Rev: 1
Id: 1/1



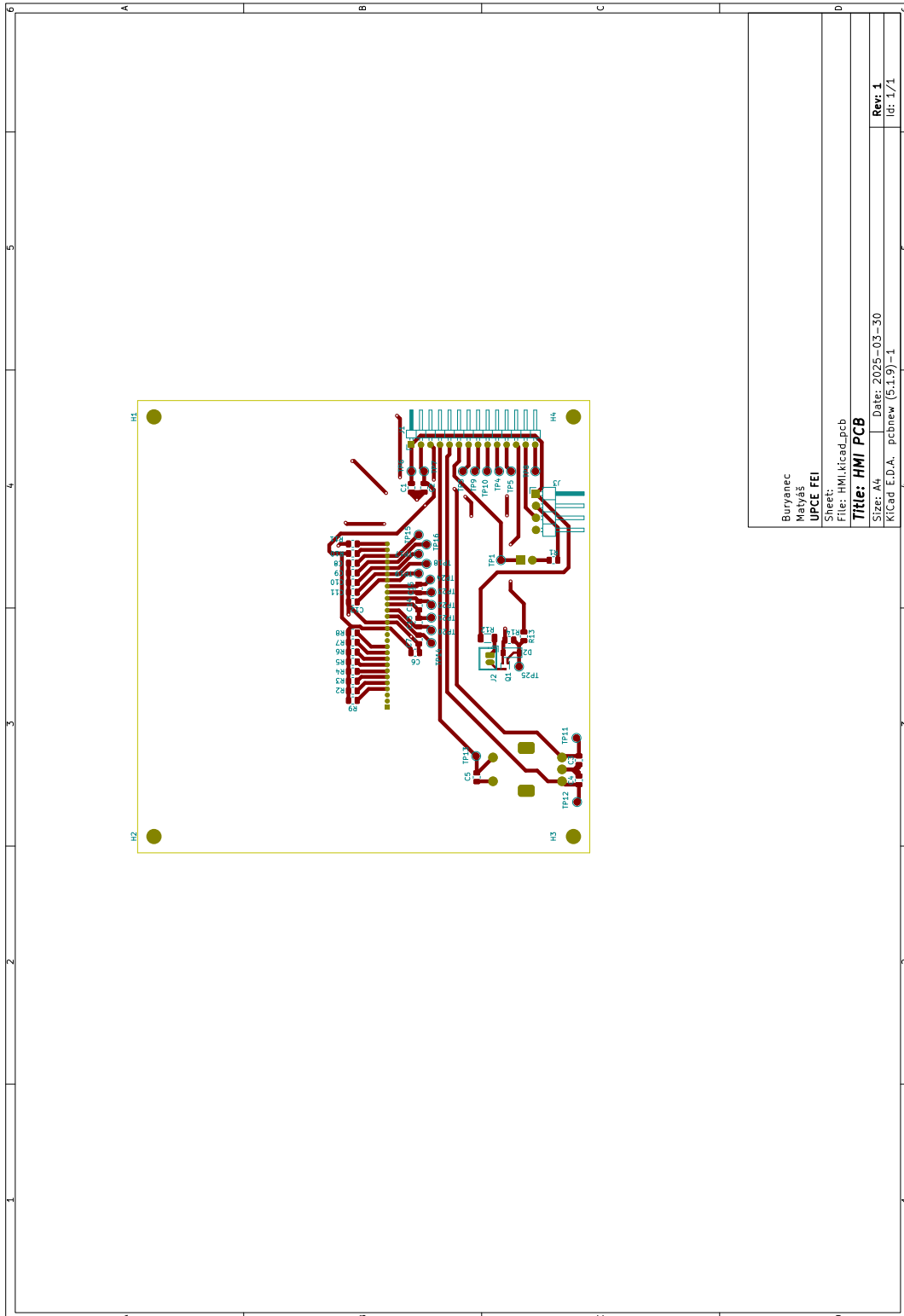


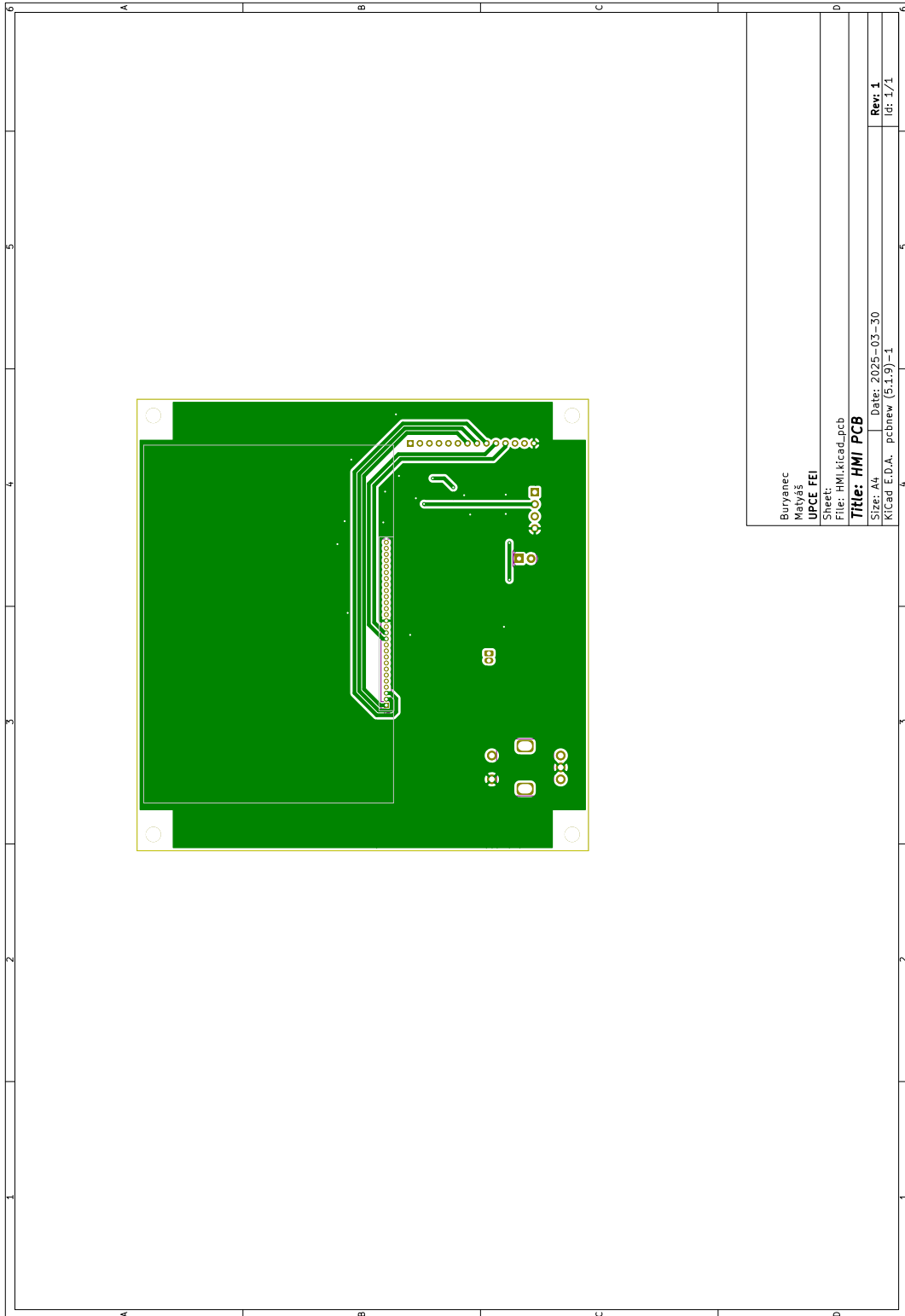
Burjaneec	
Matyas	
UPCE FEI	
Sheet:	
File:	fidici_jednotka.kicad_pcb
<b>Title:</b>	<b>Ridici Jednotka PCB</b>
Size:	A4
KiCad:	E.D.A. pcbnew (5.1.9)-1
Date:	2025-03-30
Rev:	1
Id:	1/1



Burjaneec	
Matyas	
UPCE FEI	
Sheet:	
File: fidi1_jednotka.kicad_pcb	
<b>Title: fidi1_jednotka PCB</b>	
Size: A4	Date: 2025-03-30
KiCad E.D.A.	pcbnew (5.1.9)-1
	<b>Rev. 1</b>
	Id: 1/1

## Příloha B – DPS obvodu rozhraní člověk stroj





Buryanec

Matyas

UPCE FEI

Sheet:

File: HMI.kicad\_pcb

**Title: HMI PCB**

Size: A4

Date: 2025-03-30

KiCad E.D.A. pcbnew (5.1.9)-1

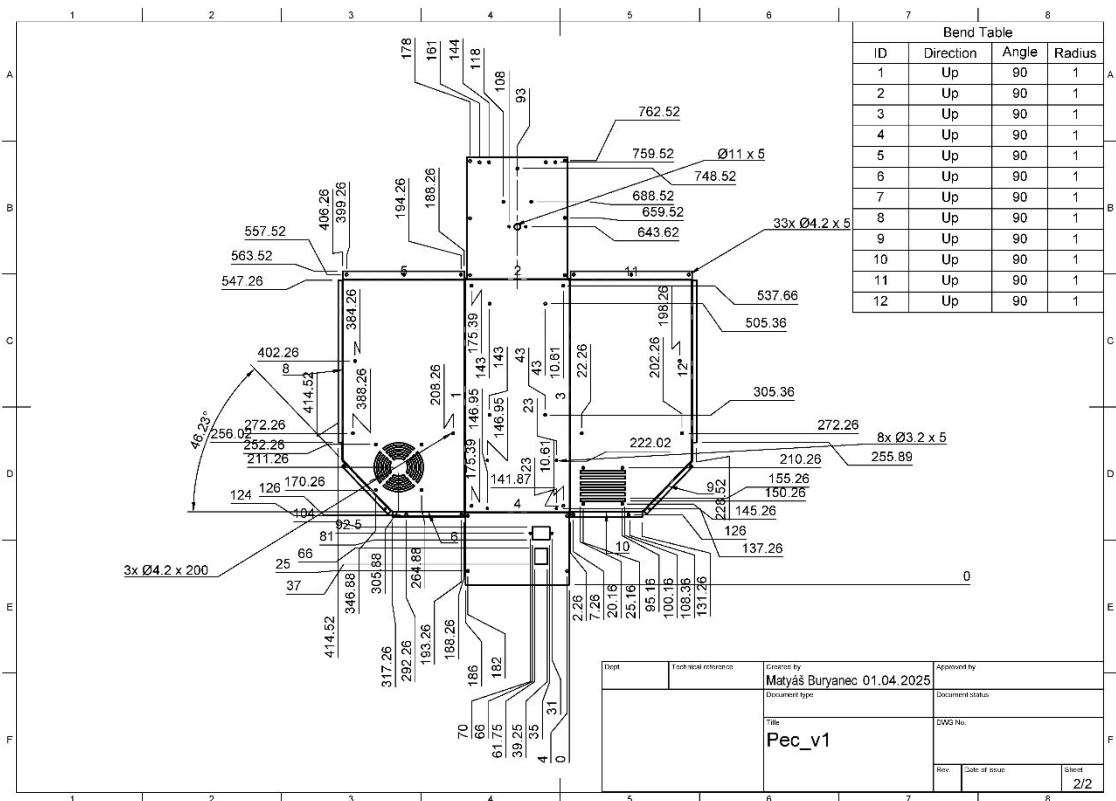
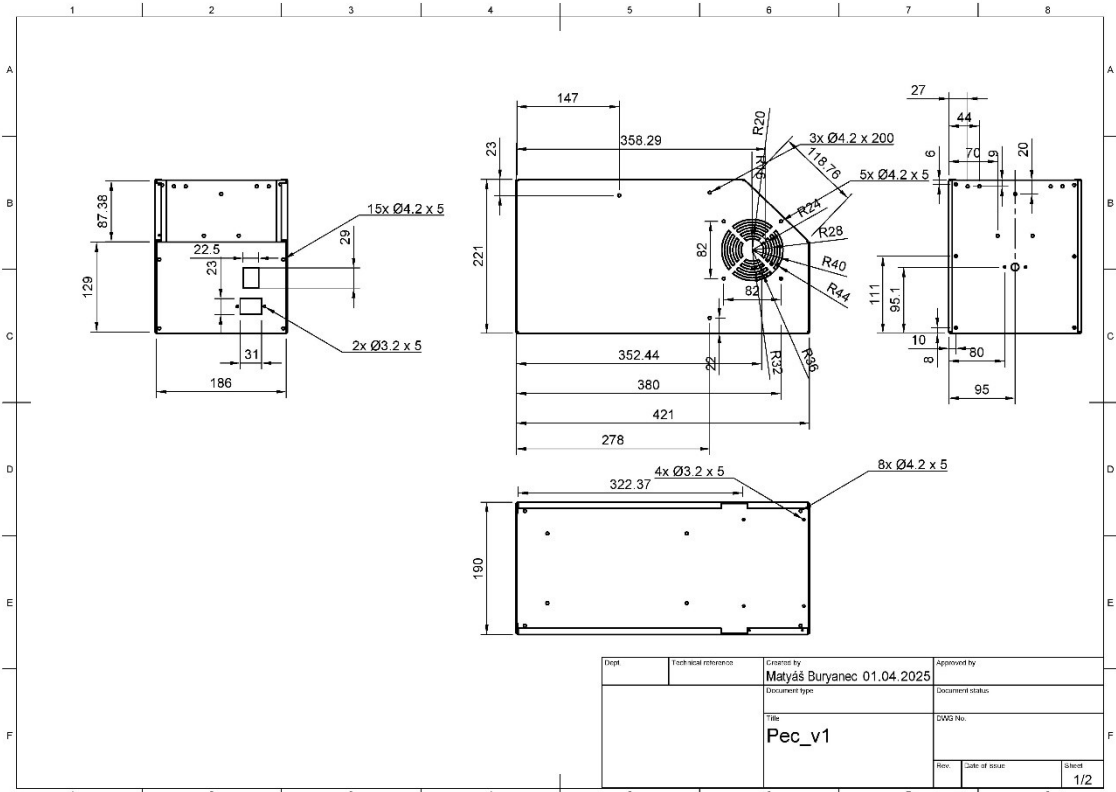
Rev. 1

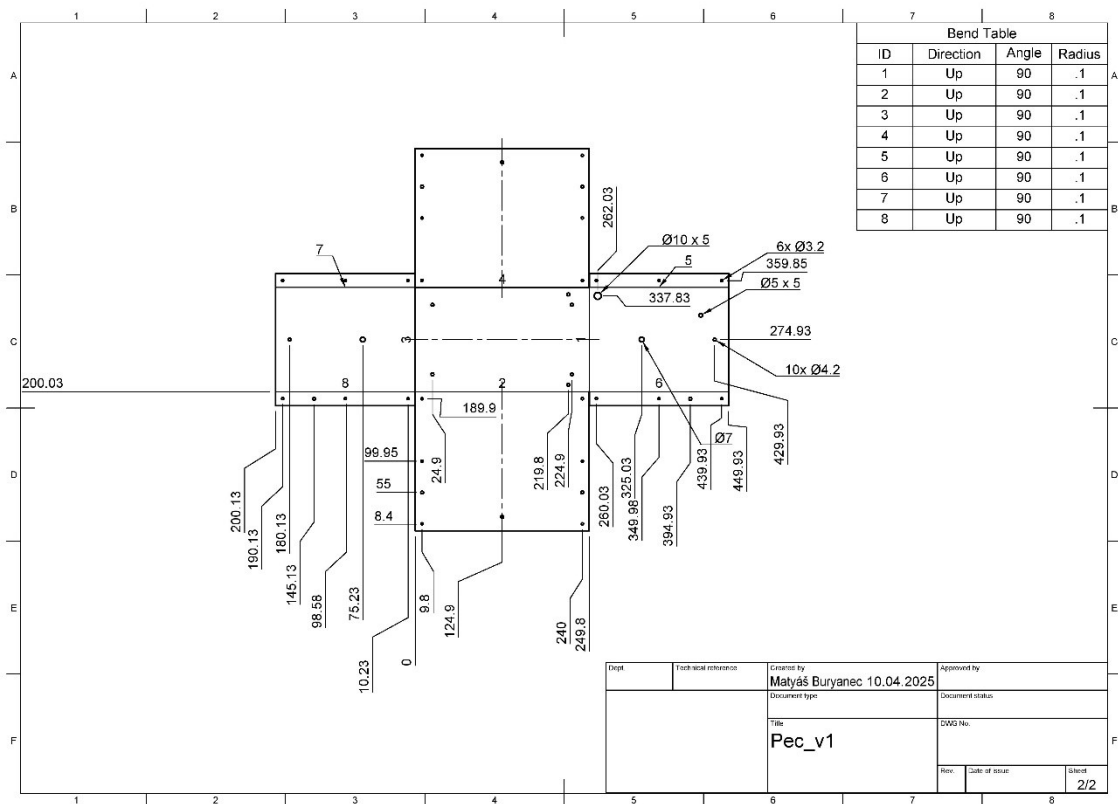
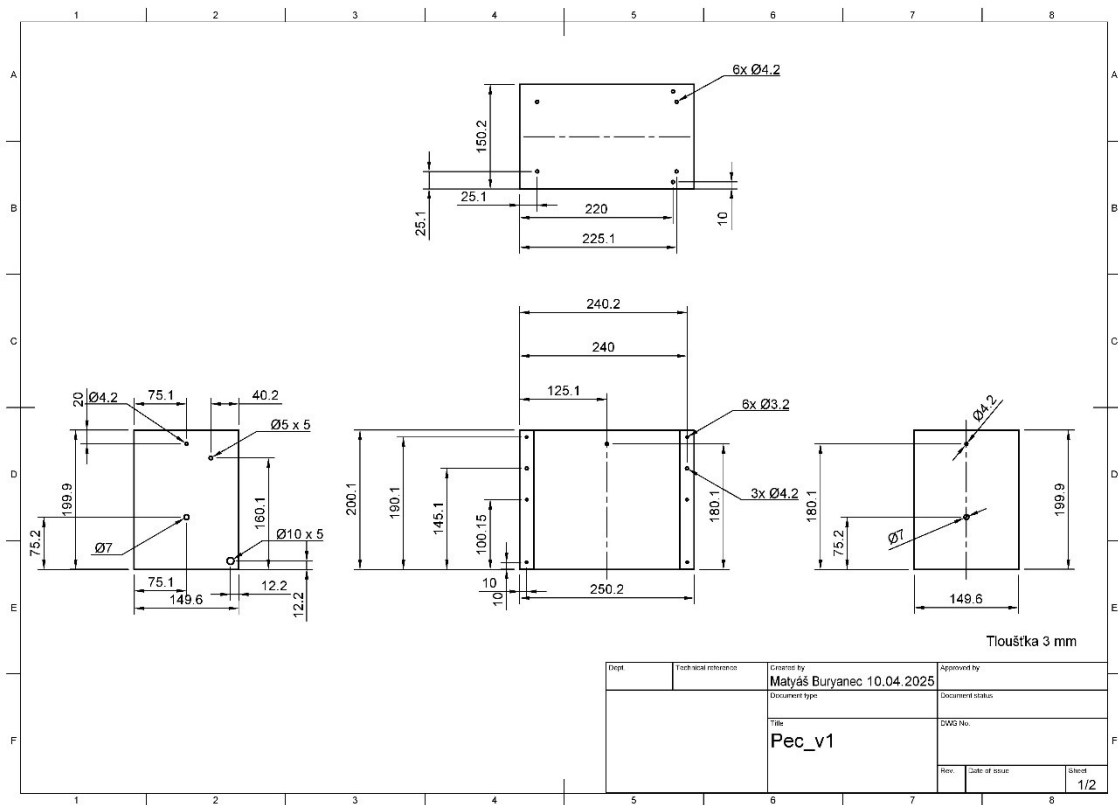
Id: 1/1

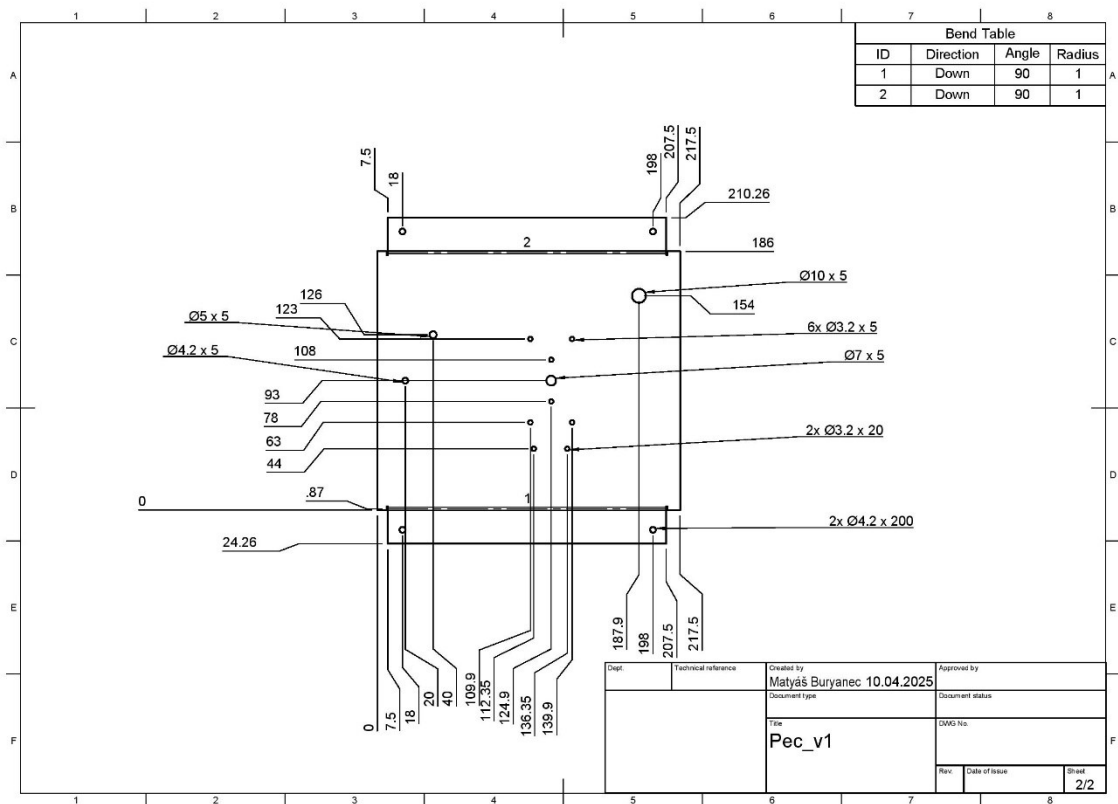
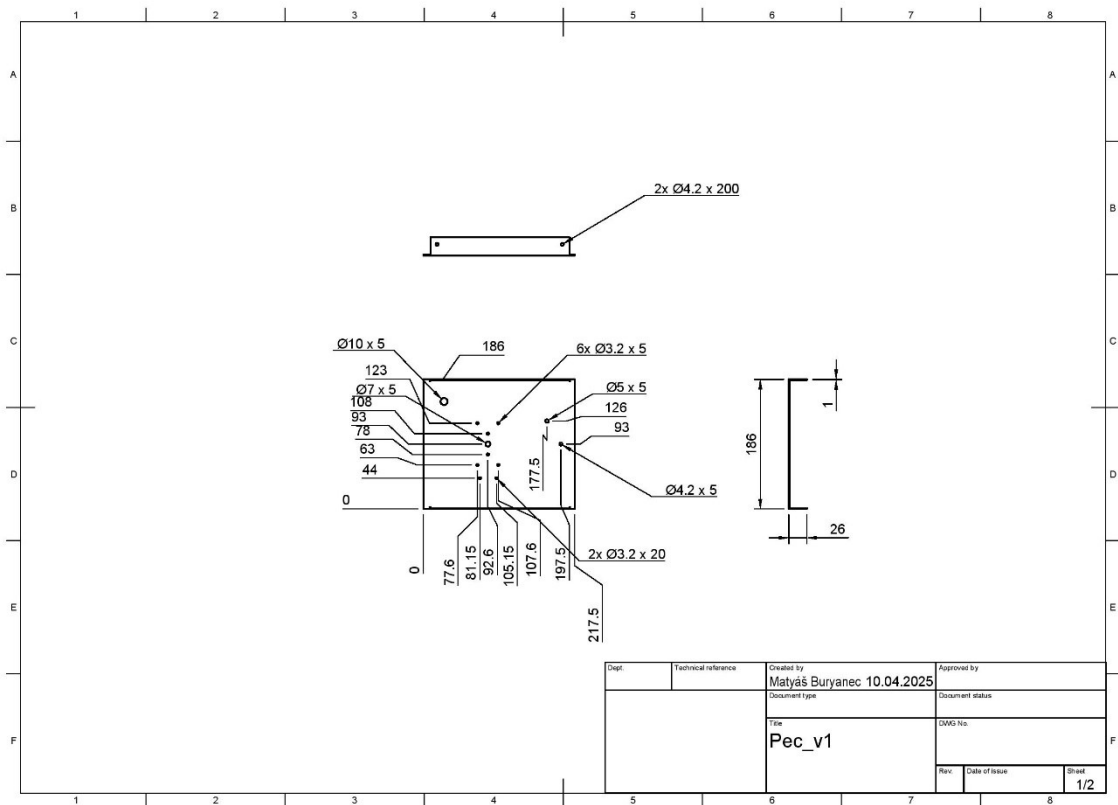
## **Příloha C – Zdrojový kód**

Zdrojový kód a konfigurační bity jsou přiloženy jako textový soubor u elektronické verze dokumentu.

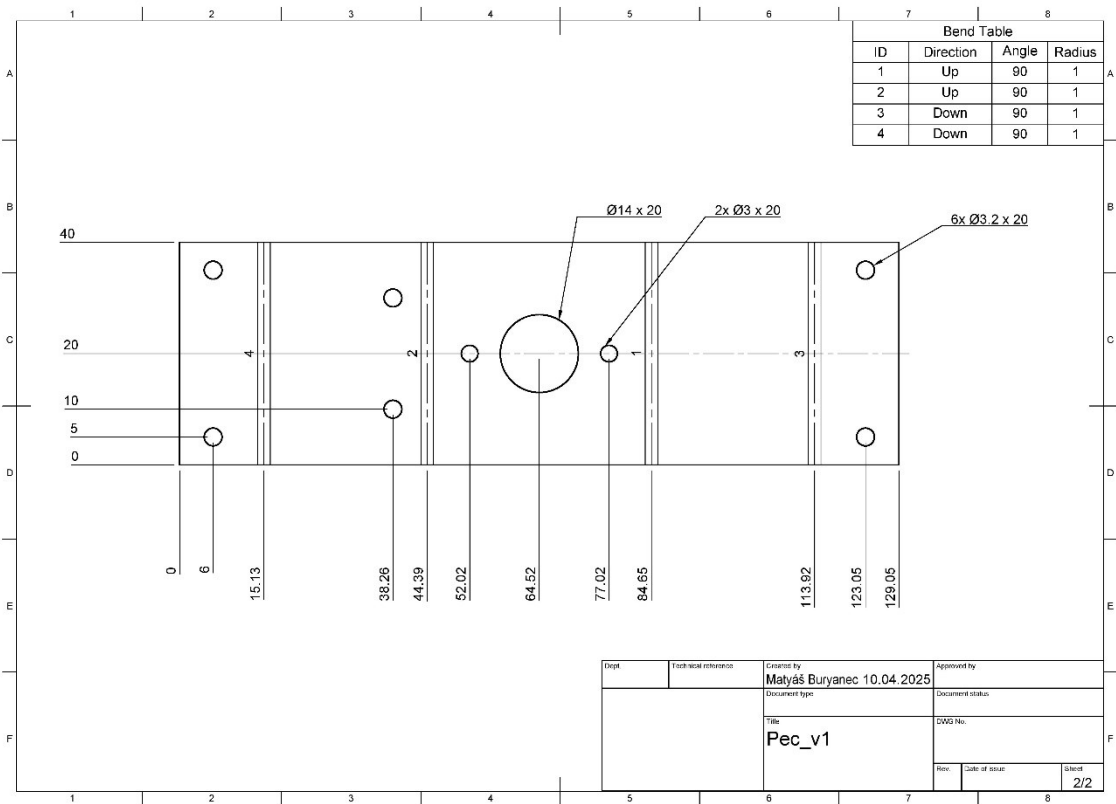
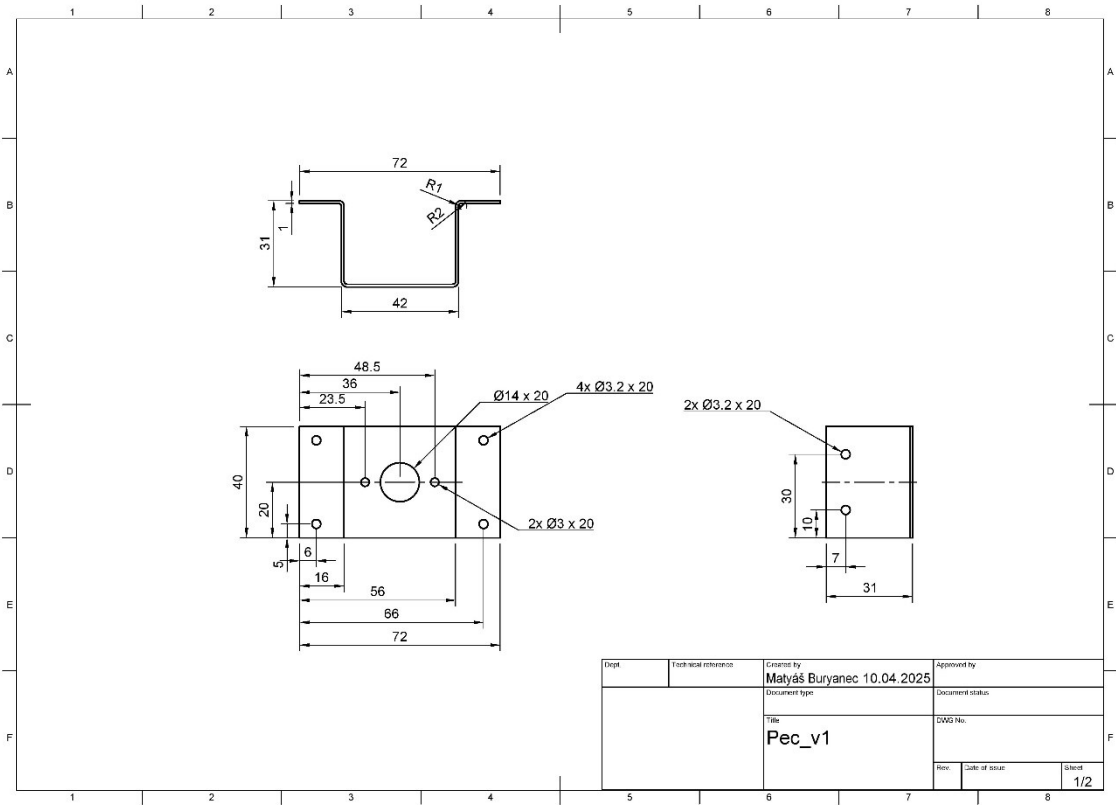
# Příloha D – Výkres konstrukce

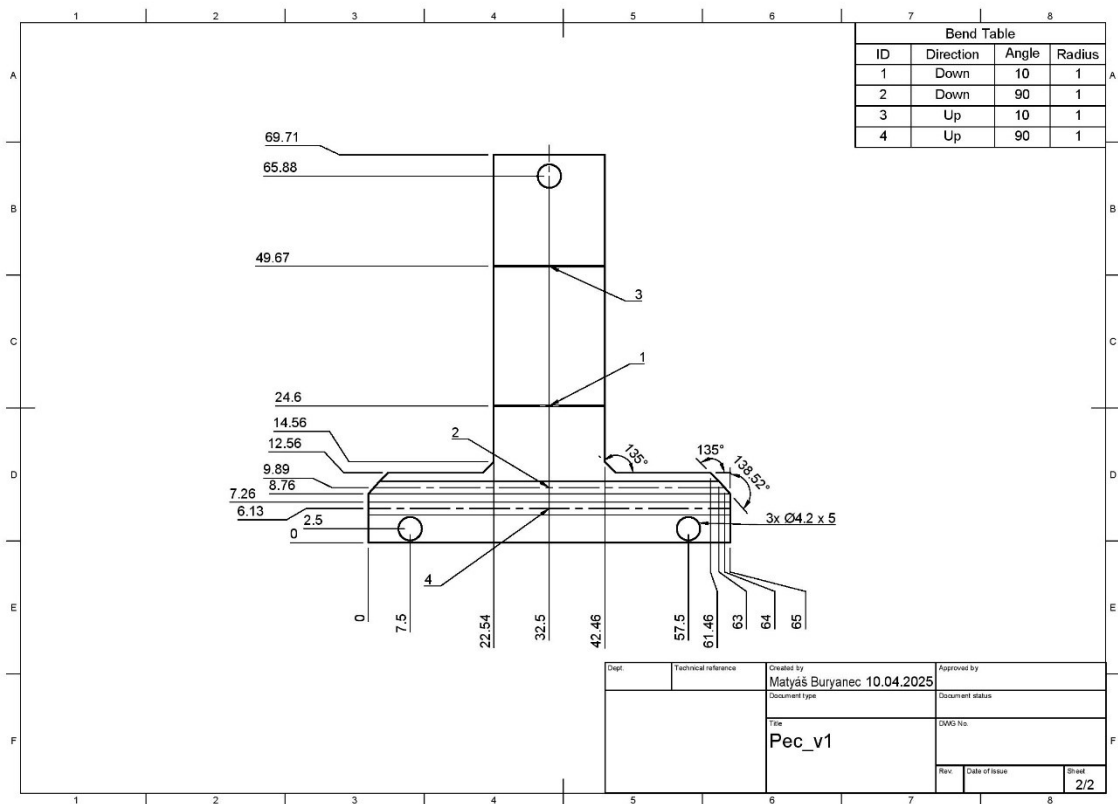
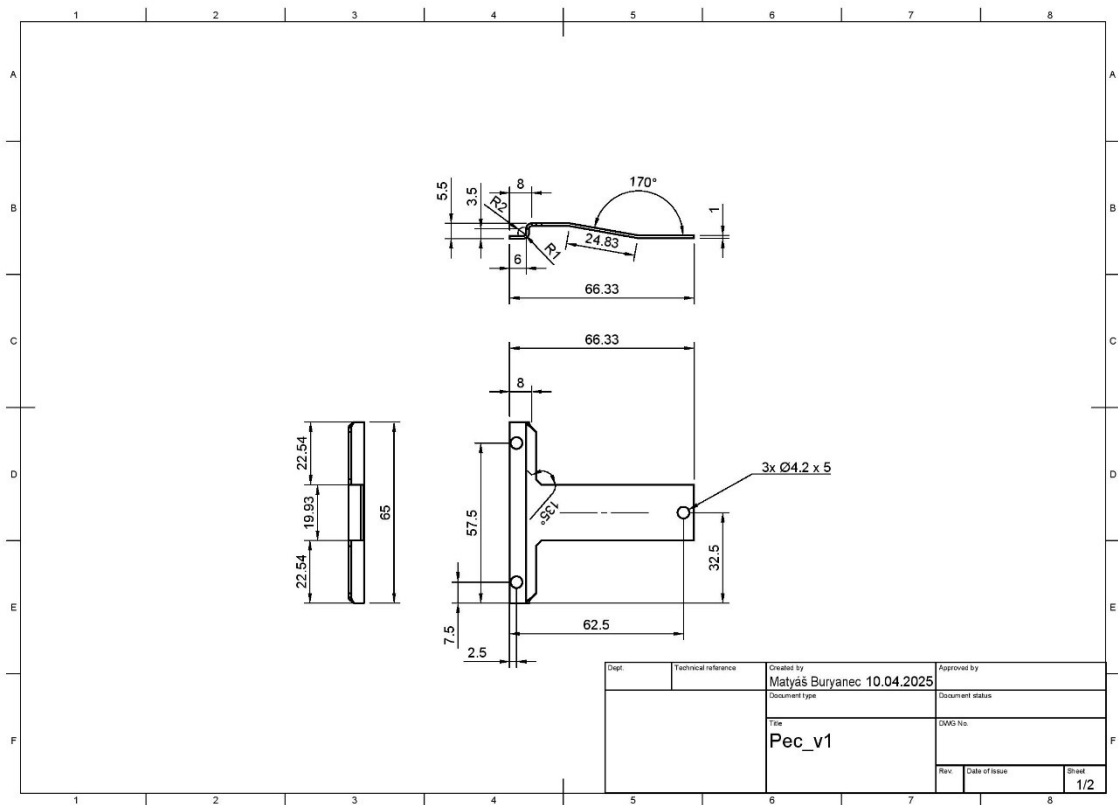


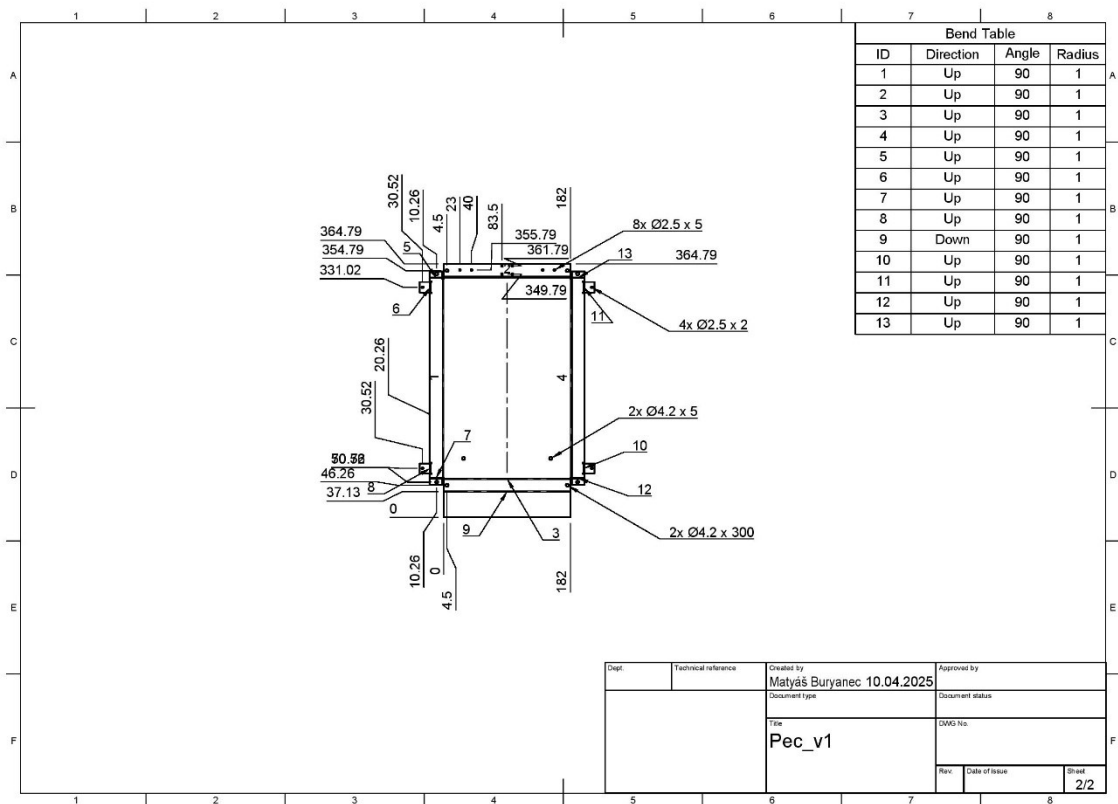
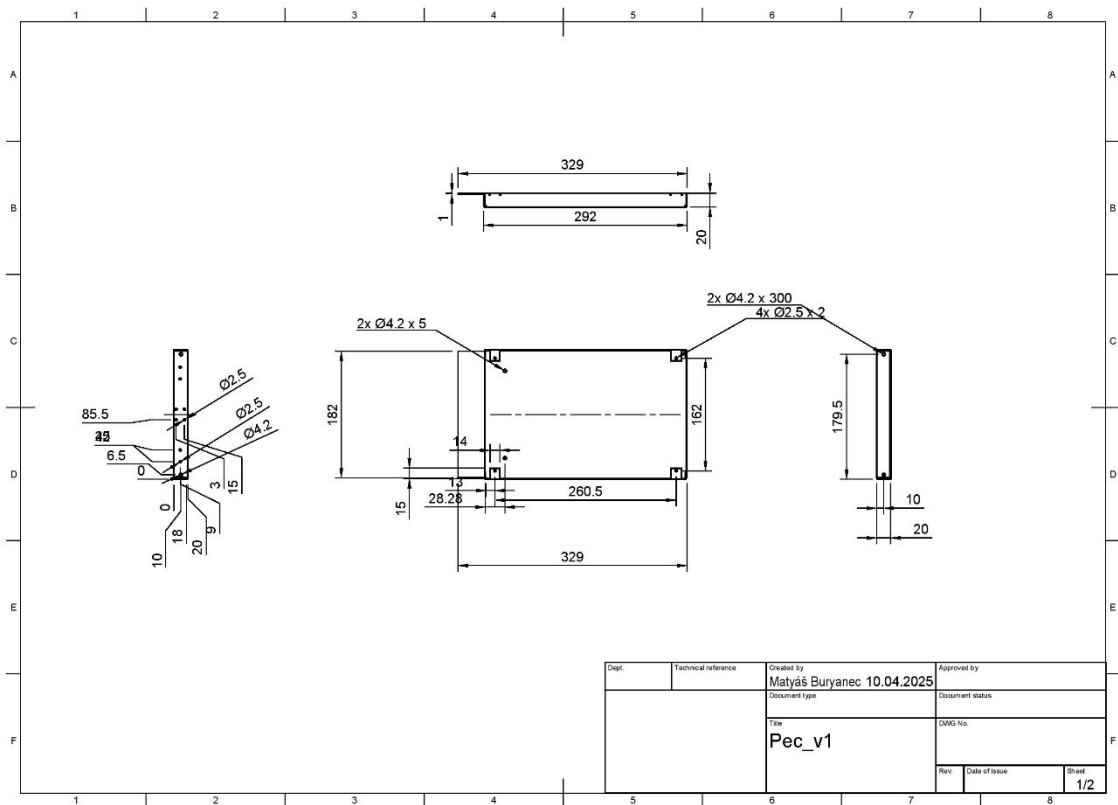


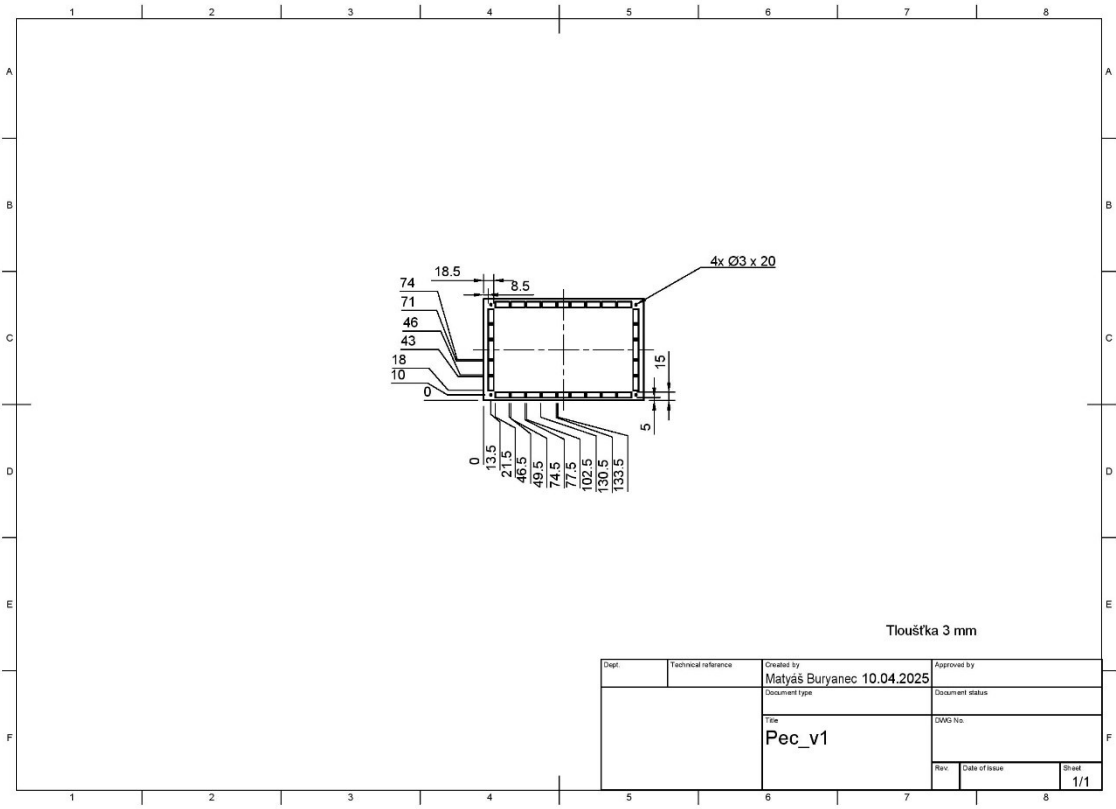


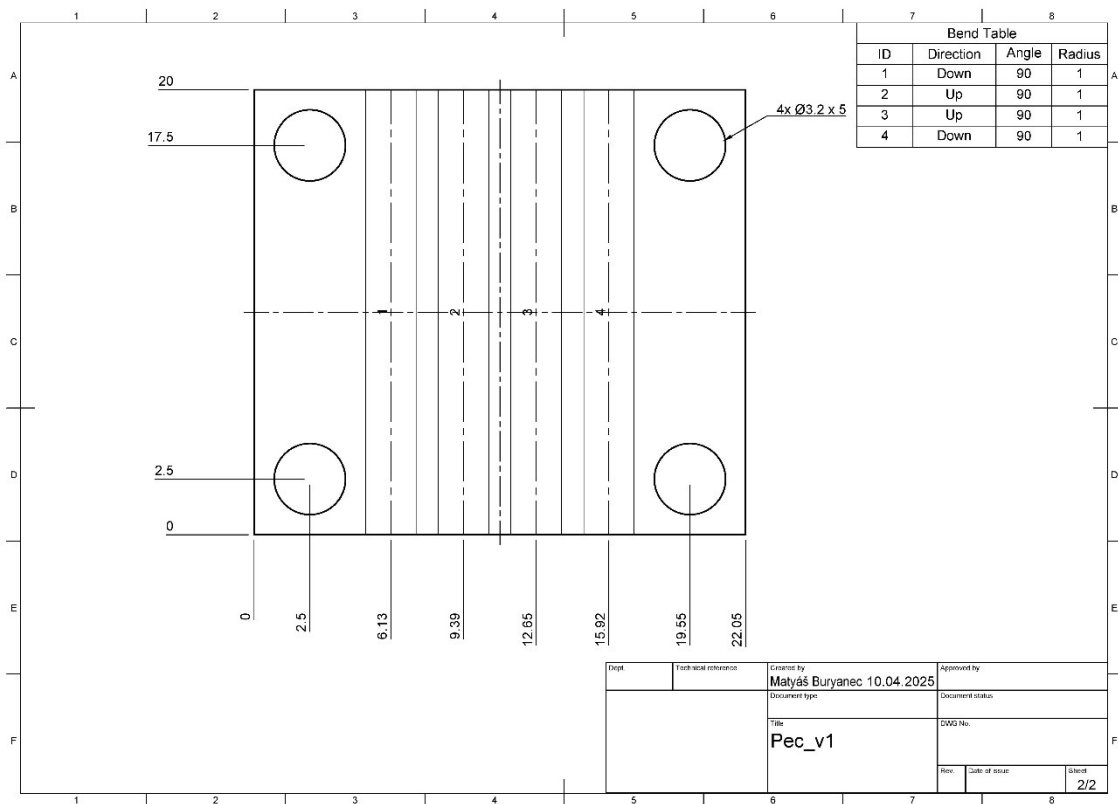
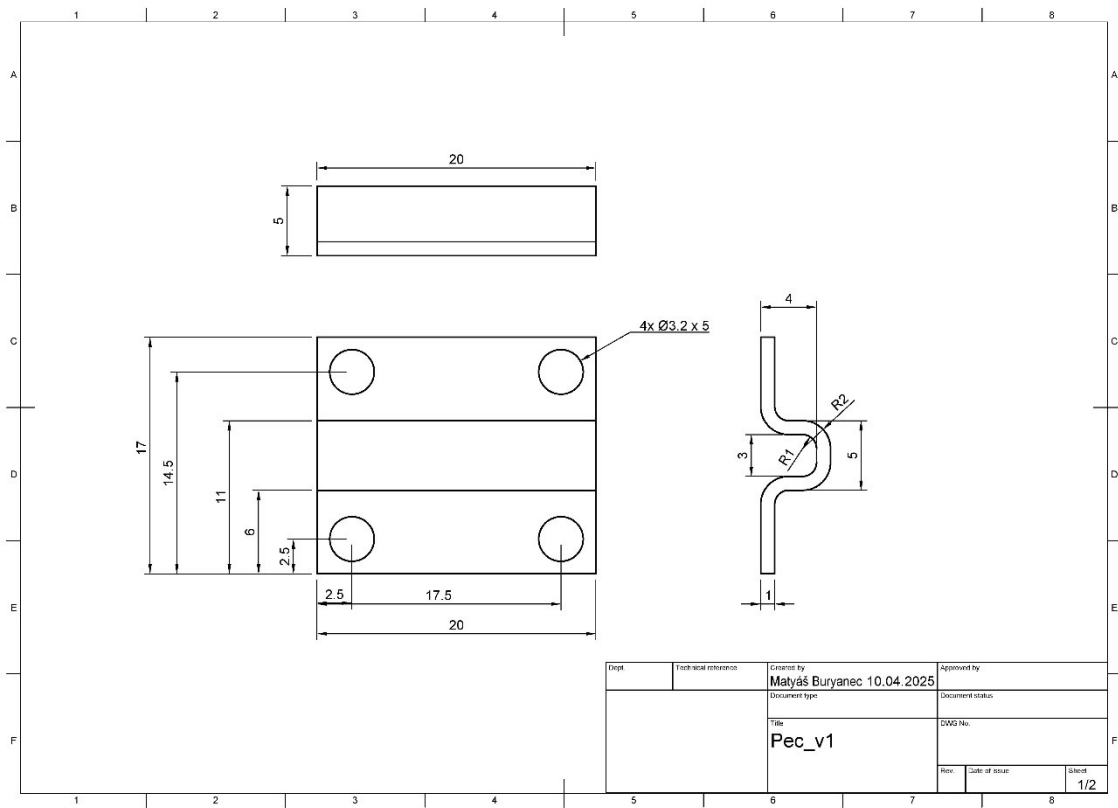






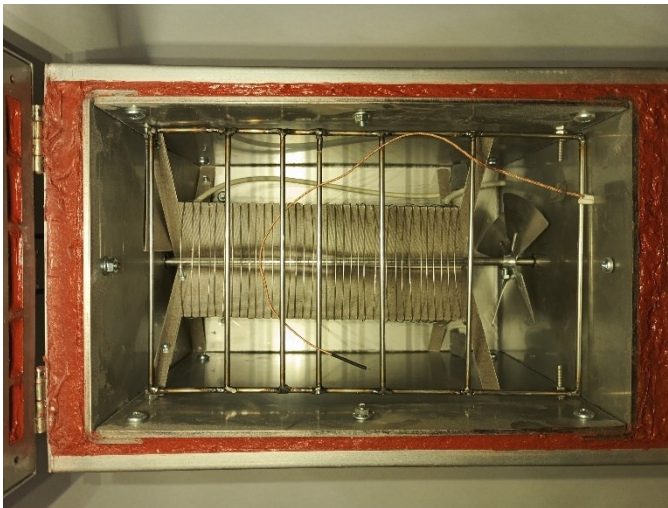
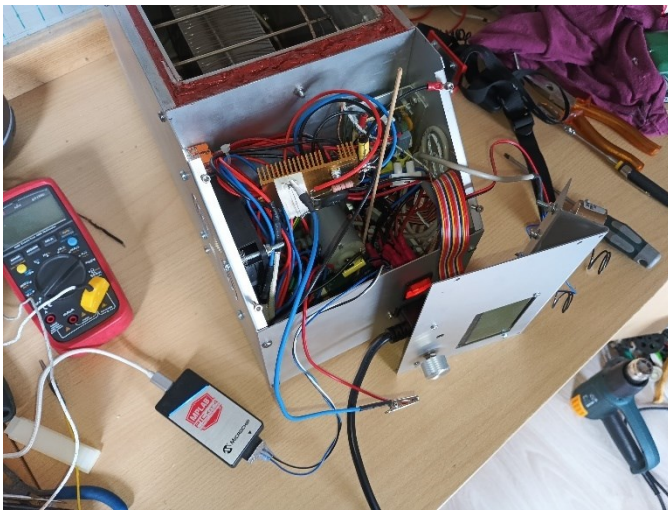
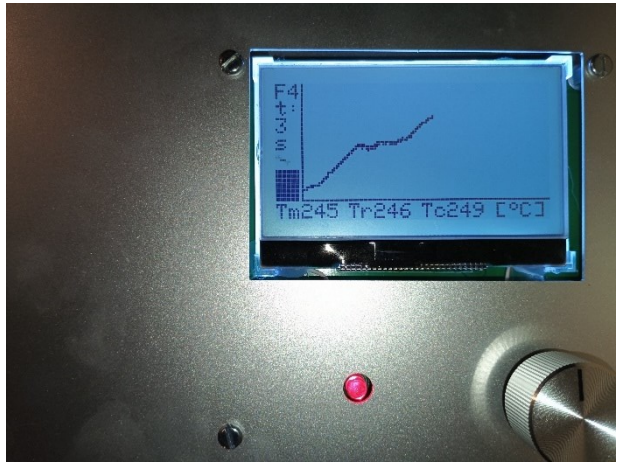
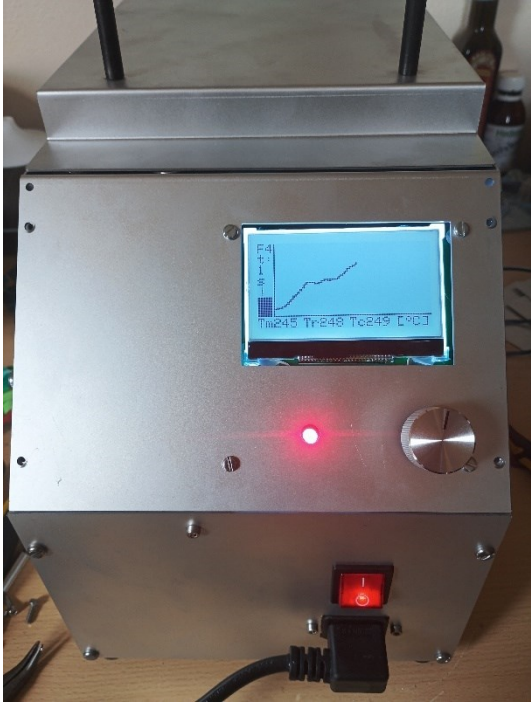






## Příloha E – Fotodokumentace





## Příloha F – Návod k obsluze

# Pájecí pec Návod k obsluze



## Obsah

- 1 Základní popis
- 2 Technické parametry
- 3 Doporučené použití zařízení
- 4 Bezpečnostní pokyny
- 5 Rozsah dodávky
- 6 Instalace
- 7 Popis zařízení
- 8 Popis ovládacího panelu
- 9 Pájecí profil
- 10 Ovládání zařízení
- 11 Čištění a údržba
- 12 Chybové kódy
- 13 Řešení problémů
- 14 Záruka
- 15 Likvidace

## 1 Základní popis

Prototypovací pájecí pec na SMD součástky je kompaktní zařízení určené pro přesné a spolehlivé pájení pomocí tepelné konvekce. Umožňuje efektivní pájení plošných spojů v malých sériích a při vývoji prototypů.

Ohřev je realizován proudem horkého vzduchu, který zajišťuje rovnoměrné rozložení teploty a optimální průběh pájení. Vzduch je uvnitř pece rovnoměrně rozháněn vestavěným ventilátorem, což zajišťuje konzistentní ohřev celé desky plošných spojů. Díky pokročilé regulaci teploty pomocí PID regulátoru je zajištěna vysoká přesnost a reprodukovatelnost teplotního profilu.

Plošné spoje se vkládají do pece přes vrchní víko, což umožňuje snadnou manipulaci a rychlou výměnu desek. Intuitivní uživatelské rozhraní umožňuje nastavení a sledování pájecího procesu, přizpůsobení teplotního profilu a optimalizaci výsledků.

Zařízení je ideální pro vývojové laboratoře, opravárenská pracoviště a malosériovou výrobu.

## 2 Technické parametry

Maximální teplota pece	350 °C
Typ pecní komory	S vrchním plněním
Napájení	230 V AC $\pm$ 10 %; 50 Hz
Příkon	1800 W
Rozměry (h x š x v)	422 x 186 x 241 mm
Hmotnost	12,2 kg
Pracovní teplota	0 °C až 35 °C
Pracovní vlhkost	10–90 % Rh
Maximální velikost DPS	210 x 110 mm
Materiál krytu	Lakovaná ocel
Materiál pájecí komory	Nerez
Třída ochrany	1
IP krytí	IP20
Typ regulace	PID/ON-OFF
Funkce	Pájení, sušení
Maximální doba sušení	16 h
Počet fází pájení	5
Maximální čas každé fáze pájení	90 s
Způsob chlazení	Pasivně přes automaticky otevřené víko
Ovládání	Rotační enkodér a grafický displej
Další funkce	Nastavení, diagnostika, automatická detekce chyb

### 3 Doporučené použití zařízení

Pájecí pec je navržena pro efektivní a spolehlivé pájení elektronických součástek na deskách plošných spojů (DPS). Pro dosažení optimálních výsledků doporučujeme dodržovat následující zásady:

- Výběr vhodného pájecího profilu: Přizpůsobte teplotní křivku konkrétním materiálům a typům pájecí pasty. Doporučuje se provést testovací cykly pro nastavení optimálních parametrů.
- Příprava DPS a součástek: Ujistěte se, že desky i součástky jsou čisté a zbavené nečistot či oxidačních vrstev. Použití nekvalitních nebo znečištěných materiálů může negativně ovlivnit pájecí proces.
- Použití správné pájecí pasty: Volba vhodné pasty je klíčová pro kvalitní spoj. Dodržujte doporučené podmínky skladování a aplikace, aby nedošlo k degradaci materiálu.
- Kontrola rovnoměrného rozložení tepla: Při osazování DPS dbejte na správnou orientaci součástek a rovnoměrné rozmístění, aby se zabránilo tepelným nerovnováhám a nežádoucímu přehřívání.
- Pravidelná údržba zařízení: Pro udržení stabilního výkonu a dlouhé životnosti pece pravidelně čistěte topnou komoru a kontrolujte správnou funkci všech součástí.

Dodržováním těchto doporučení zajistíte vysokou kvalitu pájených spojů a spolehlivý provoz zařízení v souladu s požadovanými standardy.

Použití zařízení k jinému účelu je možné pouze na riziko uživatele. Výrobce nenesе žádnou zodpovědnost za újmy způsobené nesprávným použitím pájecí pece.

### 4 Bezpečnostní pokyny

Při používání pájecí pece dbejte na následující bezpečnostní pokyny, aby byla zajištěna bezpečnost obsluhy i dlouhá životnost zařízení:

- Obecná bezpečnost: Používejte pec pouze k určenému účelu a v souladu s tímto katalogovým listem. Instalaci, údržbu a opravy smí provádět pouze kvalifikovaný personál. Přístroj nemůže být obsluhován osobami (včetně dětí) se sníženými fyzickými, smyslovými nebo mentálními schopnostmi nebo s nedostatečnými zkušenostmi nebo znalostmi, pokud nejsou pod dohledem nebo pokud nebyly seznámeny s pokyny týkajícími se bezpečného užívání přístroje osobou odpovědnou za jejich bezpečnost.
- Elektrická bezpečnost: Připojte pec pouze k odpovídajícímu elektrickému napětí dle technické specifikace. Pravidelně kontrolujte stav napájecího kabelu a zástrčky, poškozené součásti ihned vyměňte. Přístroj vždy odpojte od napájení, má-li být ponechán nestřežený a vždy před montáží, demontáží či čištěním. Nedotýkejte se přístroje či zástrčky, pokud máte mokré ruce nebo nohy. Pokud chcete zástrčku vytáhnout ze zásuvky, uchytňte a potáhněte za samotnou zástrčku. Nikdy netahejte za přívodní kabel. V případě poruch zařízení se je nepokoušejte opravit. Přístroj vypněte, vytáhněte zástrčku ze zásuvky a obraťte se na technický servis.

- Tepelná bezpečnost: Během provozu dochází k vysokým teplotám – zabraňte kontaktu s horkými povrchy a používejte vhodné ochranné pomůcky. Po vypnutí pece vyčkejte dostatečnou dobu na její vychladnutí před jakoukoliv manipulací.
- Ochrana proti požáru: Nepoužívejte pec v blízkosti hořlavých materiálů. Ujistěte se, že je pracovní prostor dostatečně větráný a nepřekračujte doporučené provozní podmínky.
- Větrání a odvod spalin: Při pájení mohou vznikat škodlivé výpary. Zajistěte dostatečné větrání nebo použijte odsávací systém. Nevdechujte výpary a dbejte na správnou manipulaci s tavidly.
- Ochrana zdraví: Při manipulaci s pájkou a komponenty používejte ochranné brýle a rukavice. Vyvarujte se přímému kontaktu s tavidly a olovnatou pájkou.

Dodržováním těchto pokynů minimalizujete rizika a zajistíte bezpečný a efektivní provoz pájecí pece. Výrobce neodpovídá za škody způsobené nedodržením tohoto návodu. Pečlivě uschovejte tuto brožuru. V případě předání přístroje jiným osobám jim předejte i tento návod.

## 5 Rozsah dodávky

Balení obsahuje:

- 1x Pájecí pec
- 1x Napájecí kabel 230 V s konektorem ICE C13
- 1x Návod k obsluze

## 6 Instalace

Pro správnou funkci pájecí pece je důležité dodržet následující postup instalace a prvního spuštění:

### Instalace

#### Umístění na pracovní plochu

Pec postavte na rovný, stabilní a dostatečně prostorný stůl. Ujistěte se, že kolem pece je dostatek volného prostoru pro snadnou manipulaci s deskami plošných spojů.

#### Ventilace

Zajistěte dostatečné větrání prostoru, případně připojte externí odsávání, pokud je k dispozici. Neumisťujte pec do uzavřených prostor bez přístupu čerstvého vzduchu.

#### Připojení k napájení

Použijte správný napájecí kabel a připojte zařízení k elektrické síti odpovídající specifikaci v technickém listu. Ujistěte se, že zásuvkový obvod má dostatečné jištění pro provoz pece.

## První spuštění

### Kontrola zařízení

Před zapnutím vizuálně zkontrolujte pec, zda není mechanicky poškozena. Ověřte správné připojení napájení, jeho napětí a jističní podle technických údajů pájecí pece. Zkontrolujte funkčnost displeje a ovládacích prvků.

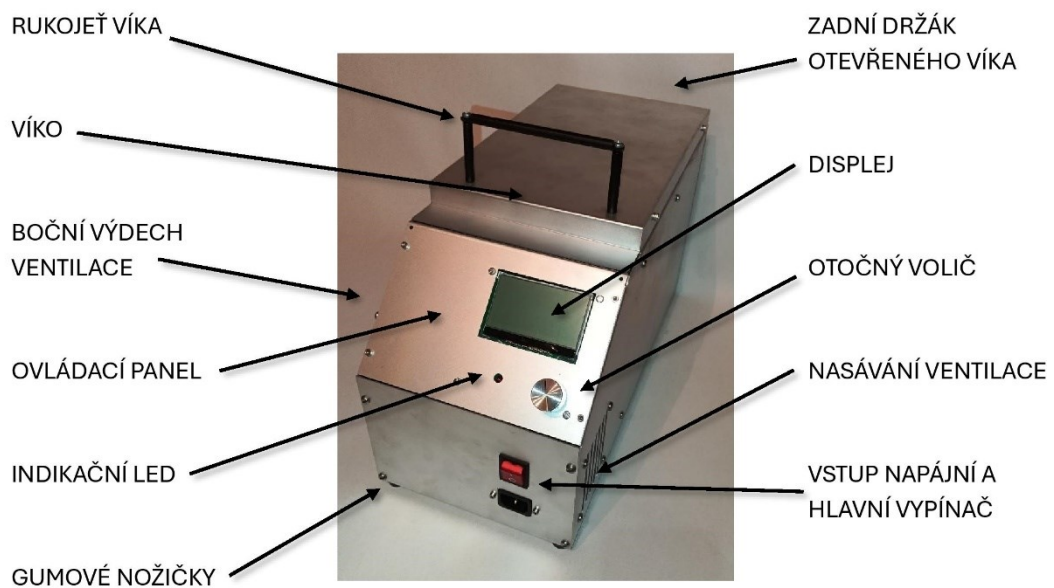
### Testovací zahřátí

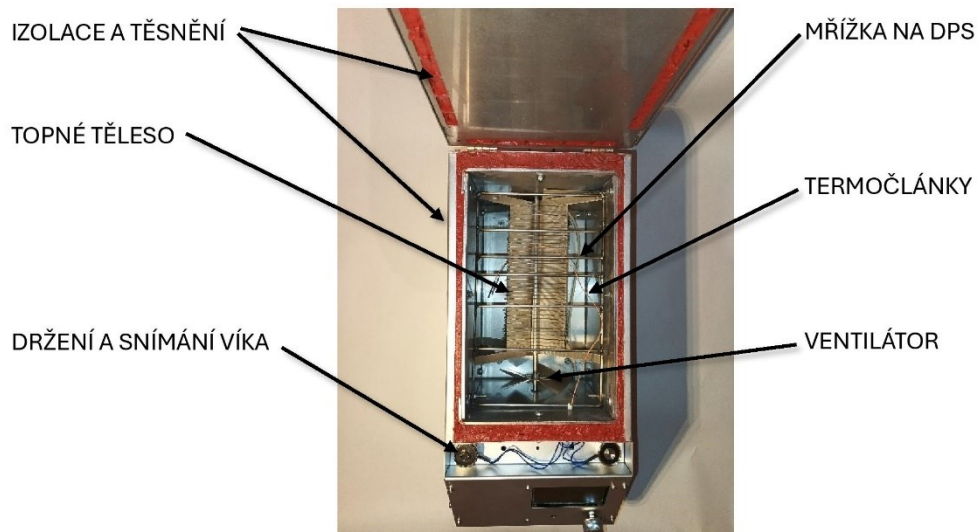
Zapněte pec a nechte ji bez vsázky proběhnout standardním pájecím cyklem, aby se ověřila správná funkce topných prvků a regulace teploty. Sledujte, zda zařízení dosahuje požadovaných teplot podle nastaveného profilu.

### Kalibrace a nastavení

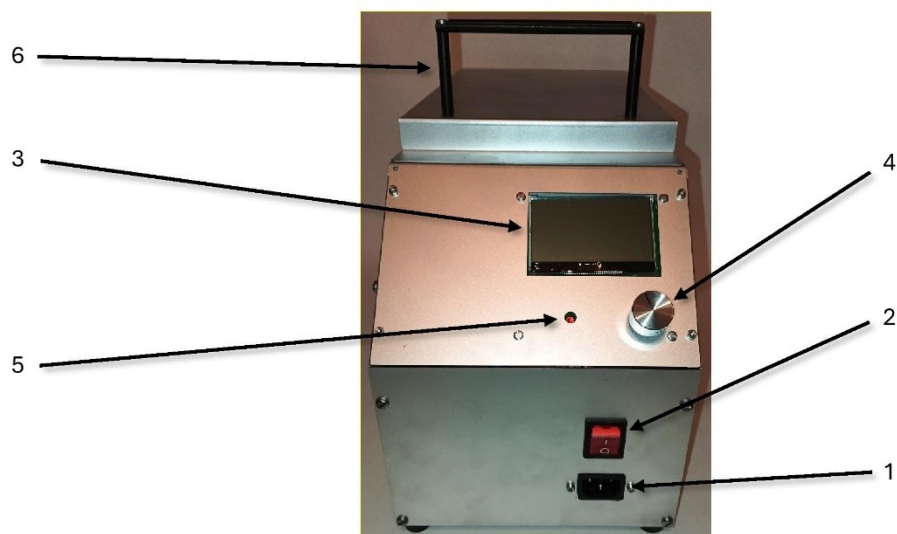
Pokud je to nutné, nastavte nebo upravte parametry podle pokynů výrobce. Otestujte různé teplotní profily na zkušebním materiálu před první reálnou aplikací. Po úspěšném prvním spuštění je pec připravena k běžnému provozu.

## 7 Popis zařízení





## 8 Popis ovládacího panelu

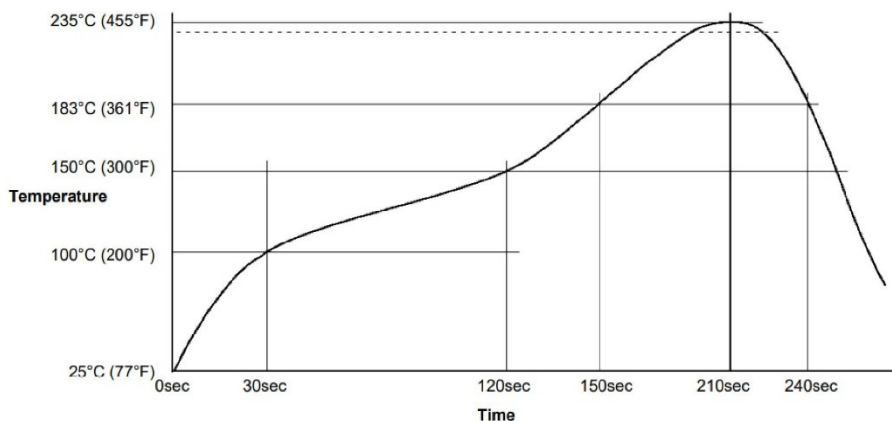


1. Síťový konektor
2. Hlavní vypínač
3. Displej
4. Otočný volič
5. Indikační LED
6. Rukojeť víka

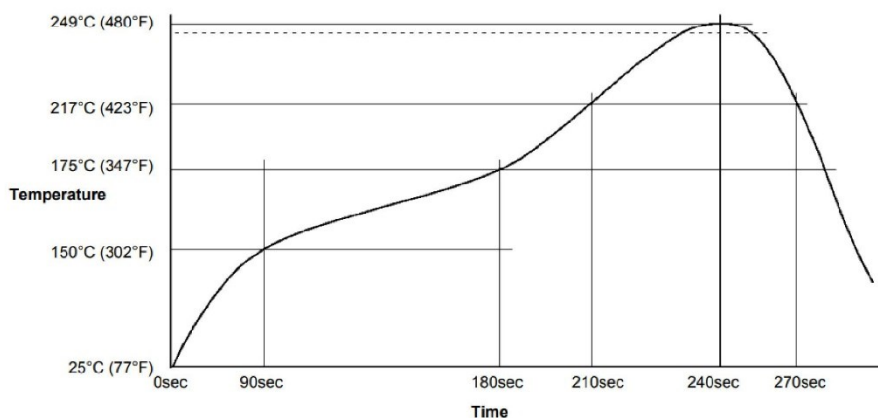
## 9 Pájecí profil

Pájecí pec má dva pevně nastavené pájecí profily a jeden uživatelský. První je pájecí profil pro olovnaté pájky. Druhý pájecí profil je doporučen pro bezolovnaté pájky a uživatelský profil lze nastavit v sekci nastavení podle vlastních požadavků.

- Pájecí profil pro pájení olovnatými pájkami se spustí sekvencí pájení → pájení Pb. Jedná se o běžný pájecí profil preferovaný velkým množstvím výrobců olovnatých pájek. Vyberte tuto možnost, pokud používáte olovnatou pájku a pokud se její pájecí profil shoduje s níže vykresleným grafem.

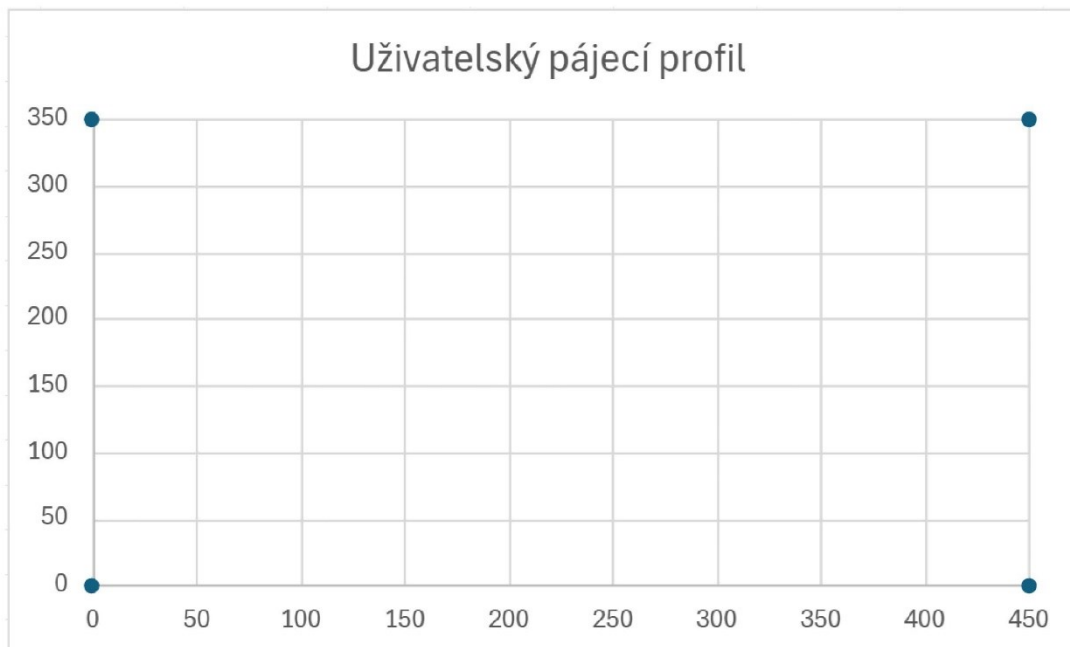


- Pájecí profil pro pájení bezolovnatými pájkami se spustí sekvencí pájení → pájení RoHS. Jedná se o běžný pájecí profil preferovaný velkým množstvím výrobců bezolovnatých pájek. Vyberte tuto možnost, pokud používáte bezolovnatou pájku a pokud se její pájecí profil shoduje s níže vykresleným grafem.



- Uživatelský pájecí profil se programuje v sekci nastavení → pájecí profil a skládá se z pěti fází. V každé fázi lze nastavit koncovou teplotu a čas fáze. Při nastavení času na hodnotu 0 bude tato

fáze při pájení vynechána. Na displeji je během nastavování vidět vizualizace profilu. Uložený profil zůstane v paměti i po odpojení zařízení od napájení. Níže je graf, kam si můžete poznamenat nastavený uživatelský pájecí profil.



## 10 Ovládání zařízení

Pro **zapnutí** přístroje zapojte zástrčku do zásuvky a následně přepněte hlavní vypínač na přední straně stroje do polohy zapnuto. Na displeji se spustí úvodní animace a základní informace o pájecí peci. Jakmile se objeví hlavní menu, můžete začít pec ovládat. Pro pohyb v menu využijte otáčení voliče po směru a proti směru hodinových ručiček. Symbol > na displeji označuje aktuálně vybranou funkci. Vstup do podmenu, či výběr zvolené funkce provedte stiskem voliče. Následující řádky informují o významu, umístění a použití jednotlivých funkcí.

**Nastavení kontrastu:** Pro vstup do nastavení kontrastu displeje stiskněte a držte volič a spusťte pec obvyklým způsobem. Volič uvolněte až v momentě, kdy uvidíte na displeji obrazovku nastavování kontrastu. Otáčením voliče měníte hodnotu a stiskem voliče potvrdíte a uložíte nastavený kontrast. Změny se projeví až po opuštění nastavování kontrastu.

**Hlavní menu:** Zobrazí se po spuštění zařízení. Na prvním řádku je napsáno „Funkce:“. Vybrat jednu ze čtyř funkcí lze pomocí otáčení voliče. Symbol > označuje právě vybrané podmenu a stisknutím voliče provedete výběr. Možnosti vstupu do podmenu jsou: Pájení, Sušení, Nastavení a Diagnostika.

**Pájení:** Toto podmenu obsahuje čtyři funkce. Pohyb symbolu > provedete otáčením voliče. Stiskem voliče uskutečnete výběr aktuálně označené funkce.

- Pájení Pb – Výběrem této funkce spustíte pájení podle profilu pro olovnaté pájky. Po výběru následujte pokyny na displeji. Ukončení pájení lze provést dvojitým stiskem voliče.
- Pájení RoHS – Výběrem této funkce spustíte pájení podle profilu pro bezolovnaté pájky. Po výběru následujte pokyny na displeji. Ukončení pájení lze provést dvojitým stiskem voliče.
- Pájení vlastní – Výběrem této funkce spustíte pájení podle uživatelského profilu. Po výběru následujte pokyny na displeji. Ukončení pájení lze provést dvojitým stiskem voliče.
- Zpět – Výběrem této možnosti se vrátíte do hlavního menu.

**Sušení:** Toto podmenu obsahuje tři nastavitelné položky a dvě funkce. Pohyb symbolu > provedete otáčením voliče. Stiskem voliče uskutečníte výběr aktuálně označené části.

- Čas – Výběrem této položky spustíte nastavování času sušení v minutách. Čas nastavíte otáčením voliče. Stiskem voliče se vrátíte zpět a nastavená hodnota zůstane uložena, dokud neopustíte celé podmenu. Čas je možné nastavovat od 0 do 960 minut.
- Teplota – Výběrem této položky spustíte nastavování teploty ve stupních celsia. Teplotu nastavíte otáčením voliče. Stiskem voliče se vrátíte zpět a nastavená hodnota zůstane uložena, dokud neopustíte celé podmenu. Teplotu je možné nastavovat v rozmezí 0 až 350 °C.
- Náběh – Výběrem této položky spustíte nastavování maximálního náběhu teploty ve stupních celsia za sekundu. Náběh nastavíte otáčením voliče. Stiskem voliče se vrátíte zpět a nastavená hodnota zůstane uložena, dokud neopustíte celé podmenu. Maximální náběh teploty je možné nastavovat v rozmezí 1 až 5 °C za sekundu.
- Start – Výběrem této funkce spustíte proces sušení. Po výběru následujte pokyny na displeji. Ukončení sušení lze provést dvojitým stiskem voliče.
- Zpět – Výběrem této možnosti se vrátíte do hlavního menu. Nastavené hodnoty sušení budou ztraceny.

**Nastavení:** Toto podmenu obsahuje sedm nastavitelných položek. Používá se pro nastavení parametrů pájecí pece. Nastavení je zachováno i při vypnutí napájení pece. Ukládání do paměti probíhá při opuštění tohoto podmenu. Pohyb symbolu > provedete otáčením voliče. Stiskem voliče uskutečníte výběr aktuálně označené části.

- Pájecí profil – Volbou této možnosti spustíte nastavování uživatelského pájecího profilu. Nastavení probíhá v pěti fázích. Symbol > označuje, zda právě nastavovaná položka je teplota nebo čas dané fáze. Stiskem voliče se posouváte na nastavování následující položky. Otáčením voliče měníte vybranou hodnotu. Teplotu lze nastavovat v rozmezí 0 až 350 °C. Čas je možné nastavovat v rozmezí 0 až 90 sekund. Na displeji se postupně vykresluje graf nastavovaného pájecího profilu. Po nastavení poslední položky se zobrazí nápis „Uloženo!“ a tímto je uživatelský pájecí profil uložen do paměti.
- Regulace – Výběrem této položky vstoupíte do nastavování parametrů PID regulace. Otáčením voliče posouváte symbol > a stiskem voliče přistoupíte k nastavování konkrétního parametru zvoleného symbolem. Konkrétní parametry se nastavují otáčením voliče a stiskem voliče potvrdíte nastavenou hodnotu. Parametr P značí proporcionální složku regulátoru a nastavuje se v procentech maximální hodnoty v rozmezí 0 až 100 %. Parametr I značí integrační složku regulátoru a nastavuje se v procentech maximální hodnoty v rozmezí 0 až 100 %. Parametr D

značí derivační složku regulátoru a nastavuje se v procentech maximální hodnoty v rozmezí 0 až 100 %. Výběrem položky zpět se vrátíte do podmenu nastavení. Přepnutí regulátoru do režimu ON/OFF provedete nastavením P složky na 100, I složky na 0 a D složky také na 0. Regulátor se poté chová jako termostat s hysterezí, jinak řečeno se v tomto režimu jedná o dvupolohový regulátor.

- Bzučák – Stiskem voliče při výběru této položky zapnete nebo vypnete zvukovou indikaci.
- Podsvětlení LCD – Stiskem voliče při výběru této položky zapnete nebo vypnete podsvícení displeje.
- Ventilátor – Výběrem této položky spustíte nastavování otáček ventilátoru. Nastavování se provádí otáčením voliče. Stiskem voliče přejdete zpět na výběr položky.
- Termočlánek – Výběrem této položky vstoupíte do nastavování parametrů měření teploty pomocí termočlánků. Otáčením voliče posouváte symbol > a stiskem voliče přistoupíte k nastavování konkrétního parametru zvoleného symbolem. Konkrétní parametry se nastavují otáčením voliče a stiskem voliče potvrdíte nastavenou hodnotu. Při výběru položky T1 typ termočlátku, nebo T2 typ termočlátku vybíráte z nabídky typ, který koresponduje s aktuálně používaným termočlátkem v pájecí peci. T1 a T2 označuje první a druhý termočlánek. Z výroby je toto nastavení automaticky provedeno a měnit jej je nezbytné pouze po výměně termočlátku za nový. Výběrem položky maskování chyb T1 nebo T2 vstoupíte do nastavování maskování konkrétních chyb. Otáčením voliče lze docílit libovolné kombinace. Jednička na konkrétní pozici značí, že chyba na příslušné pozici bude ignorována, přičemž se doporučuje používat tuto funkci pouze v případě diagnostikování chyby. Poslední položka zpět uzavře nastavování a vrátí program do podmenu nastavení.
- Zpět – Výběrem této položky se vrátíte zpět do hlavního menu. Veškeré změny budou uloženy.

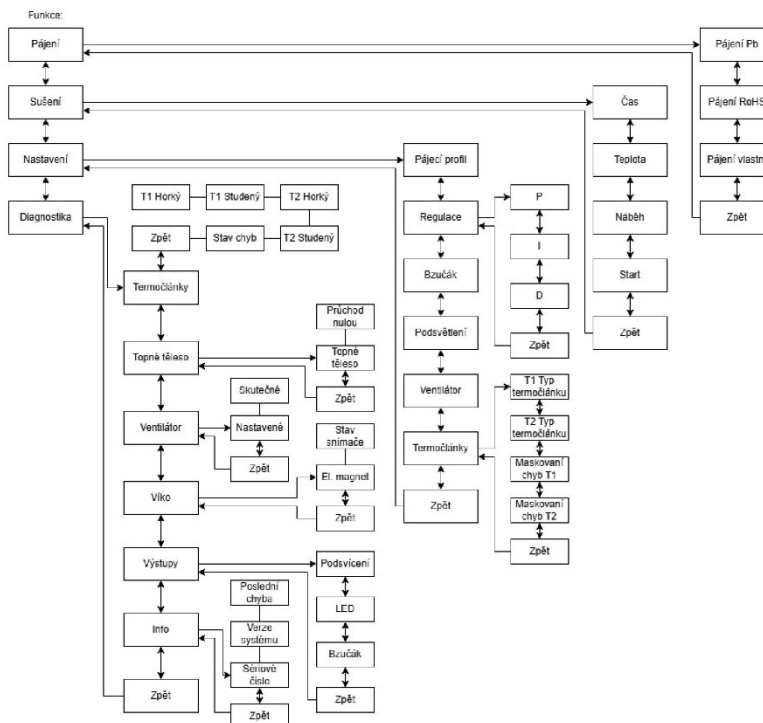
**Diagnostika:** Toto podmenu obsahuje sedm nastavitelných položek. Používá se pro diagnostiku pájecí pece. Změněné nastavení není ukládáno a po opuštění se parametry nastaví na poslední uložené hodnoty v EEPROM paměti. Pohyb symbolu > provedete otáčením voliče. Stiskem voliče uskutečníte výběr aktuálně označené části.

- Termočlánek – Výběrem tohoto podmenu se zobrazí informace o termočláncích. Stisknutím voliče přejde program zpět do podmenu diagnostika. Mezi zobrazovanými parametry je teplota teplého i studeného spoje obou termočlánků a indikace chyb termočlánků, kterou je možné rozklíčovat podle tabulky v sekci chyby níže.
- Topné těleso – Výběrem tohoto podmenu se zobrazí informace označená nápisem průchod nulou. Číslo vyobrazené na displeji značí frekvenci průchodu síťového napětí nulou. Pro 50Hz síť bude správné číslo 100 Hz a pro 60Hz síť bude správně 120 Hz. Pokud se objeví místo čísla NaN, není na spínači pro topné těleso žádný průběh napětí. Otáčením voliče lze vybrat možnost topné těleso nebo zpět. První možnost stiskem voliče spustí nebo vypne topné těleso na 100 % výkonu. Druhá možnost vrátí program zpět do podmenu diagnostika.
- Ventilátor – Výběrem této možnosti přistoupíte k diagnostikování ventilátoru. Symbol > lze přemístit otáčením voliče. Výběrem položky nastavené pomocí stisku voliče můžete otáčením voliče měnit požadované nastavené otáčky ventilátoru. Skutečné změřené otáčky jsou

v řádku skutečné. Opětovným stiskem se vrátíte na výběr a při výběru položky zpět se vrátíte do podmenu diagnostika.

- Víko – Výběrem podmenu víko začnete diagnostikovat funkci spojenou s uzavíráním víka pece. Na řádku s názvem stav snímače lze vidět aktuální stav víka. Pokud víko uzavřete, měl by se stav změnit. Symbol > lze přemístitovat otáčením voliče. Stiskem voliče při vybrané funkci el. magnet spustíte nebo vypnete elektromagnety víka. Výběrem zpět se vrátíte do podmenu diagnostika.
- Výstupy – Výběrem této položky lze diagnostikovat základní prvky uživatelského rozhraní. Otáčením voliče se pohybujete v podmenu. Stiskem měníte stav aktuálně vybrané položky. Podsvícení aktivuje nebo vypne podsvětlení displeje. LED aktivuje nebo vypne svítivou diodu na čelním panelu. Bzučák aktivuje nebo vypne pískání. Položka zpět vrátí program do podmenu diagnostika a všechna nastavení vrátí na hodnoty uložené v EEPROM paměti.
- Info – V tomto podmenu je info pájecí pece. Na prvním řádku je vidět poslední uložená chyba pece, která se po opuštění tohoto podmenu vymaže. Na druhém řádku je informace o verzi systému. Kontaktujte výrobce s žádostí o přehrání firmware, pokud je to pro váš model umožněno. Výběrem položky sériové číslo stisknutím voliče uvidíte sériové číslo Vaší pece. Opětovným stiskem voliče přejdete zpět do podmenu info. Otáčením voliče se pohybujete v podmenu. Výběrem položky zpět se vrátíte do podmenu diagnostika.  
*Pokud pětkrát po sobě projedete menu směrem dolů tak, aby ukazatel sám přeskočil opět na začátek, spustí se tajná hra.*
- Zpět – Výběrem této položky se vrátíte zpět do hlavního menu.

Rozložení menu je znázorněno také na následujícím obrázku.

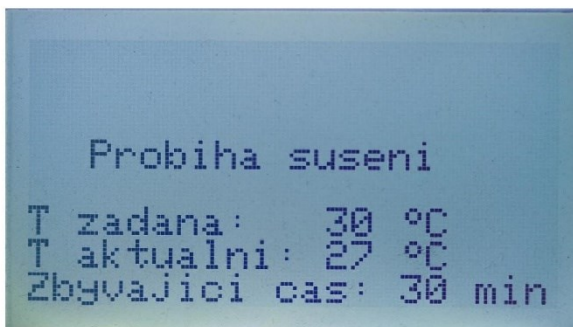


#### Spouštění pájení či sušení:

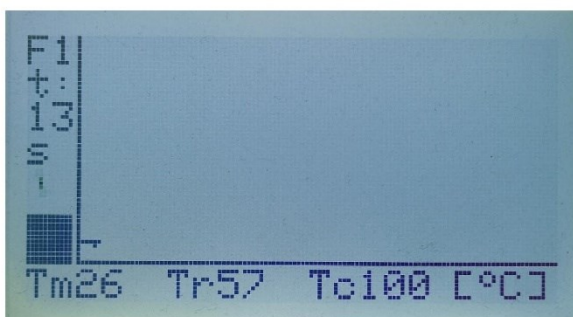
Pro spuštění nejprve vložte vsázku do pece. Následně pec zapněte hlavním vypínačem a spusťte požadovanou funkci. Následně vás displej vyzve k uzavření víka. Jakmile tak učiníte, spustí se proces.

#### Rozložení displeje během pájení či sušení.

Obrázek níže zobrazuje rozložení displeje při funkci sušení. Je zde k vidění zadaná teplota a aktuální teplota v peci. Na posledním řádku se nachází informace o zbývajícím čase do konce sušení.



Na obrázku níže je k vidění rozložení displeje při aktivní funkci pájení. V prostoru odděleném od textu přímkami se bude vykreslovat graf skutečného průběhu teploty v celém procesu pájení. Označení F1 informuje o aktuální fázi pájení (1 až 5). Pod ním je zbývajcí čas aktuální fáze. Níže se nachází rotující přímka, která ukazuje, že pájení je spuštěné. Pod ní se nachází sloupec, který mění svoji výšku na základě aktuálního výkonu topného tělesa. Na spodním řádku se nachází označení teplot. Tm značí aktuální měřenou teplotu v peci. Tr značí aktuální žádanou teplotu a Tc značí cílovou teplotu aktuální fáze.



#### Ukončení pájení či sušení:

Po úspěšném dokončení pájení nebo sušení se zobrazí informující obrazovka a ozve se zvukový signál, pokud je povolen. Stiskem voliče pokračujete do menu. Pokud se pájení nebo sušení v průběhu přeruší, na displeji se zobrazí informace o této skutečnosti a kód, pomocí kterého lze zjistit, co bylo příčinou přerušování. Stiskem voliče pokračujete do menu.

**Vypnutí** přístroje provede tak, že nejprve ukončíte všechny spuštěné procesy nebo dokončíte nastavování. Následně se pohybem v menu vraťte do hlavního menu a přepněte hlavní vypínač

na přední straně stroje do polohy vypnuto. Pokud necháte stroj delší dobu nestřežený, tak také vytáhněte zástrčku ze zásuvky. Přístroj je tak bezpečně vypnut.

## 11 Čištění a údržba

Pravidelná údržba pájecí pece zajišťuje její dlouhou životnost, stabilní výkon a kvalitní pájení. Doporučené postupy zahrnují následující kroky:

### Čištění

#### **Odstranění zbytků tavidla a oxidů**

Po každém použití nechte pec zcela vychladnout. Pravidelně odstraňujte usazeniny tavidla a pájecích zbytků z vnitřního prostoru pece pomocí suchého hadříku nebo jemného kartáče. V případě silného znečištění lze použít izopropylalkohol (IPA) na utěrku – nikdy nenanášejte přímo do pece.

#### **Čištění topných prvků**

Topné elementy udržujte bez nečistot a zbytků pájecí pasty, aby nedocházelo k nerovnoměrnému zahřívání. Dbejte na čistotu ventilátoru v peci, aby se neucpával prachem a nečistotami.

#### **Kontrola ventilačního systému**

Pravidelně kontrolujte a čistěte ventilační otvory, aby bylo zajištěno správné proudění vzduchu.

### Údržba

#### **Kontrola mechanických částí**

Pravidelně kontrolujte pohyblivé části a v případě potřeby promazávejte doporučeným mazivem. Ujistěte se, že upevňovací šrouby a spojovací prvky jsou pevně dotažené.

#### **Kontrola teplotních senzorů**

Pravidelně ověřujte přesnost teplotních čidel a v případě výrazné odchylky proveďte výměnu podle pokynů výrobce.

#### **Elektrická kontrola**

Pravidelně vizuálně kontrolujte napájecí kabel a připojení, zda nejsou poškozené. Pokud zaznamenáte nepravidelné chování pece (kolísání teploty, chyby v řízení), kontaktujte odborný servis.

#### **Doporučená frekvence údržby**

Po každém použití: Základní čištění vnitřního prostoru od zbytků tavidla. Jednou týdně: Kontrola ventilace, odstranění usazenin a prachu. Jednou měsíčně: Kontrola mechanických součástí, ventilačního systému a elektrických připojení. Každých 6 měsíců: Kontrola teplotních senzorů a hloubkové čištění. Dodržováním těchto doporučení zajistíte optimální výkon a dlouhou životnost zařízení.

## 12 Chybové kódy

### Chyby funkce

Při provozu pece se můžou vyskytnout chyby funkce. Pájecí pec je vybavena rozsáhlým autodetekčním systémem a diagnostickými funkcemi. Číselný kód poslední uložené chyby najdete v sekci diagnostika → info. Význam kódů je vysvětlen níže.

- E1 = Chyba termočlásku 1 → Termočlásek s číselným označením 1 je v chybě.
- E2 = Chyba termočlásku 2 → Termočlásek s číselným označením 2 je v chybě.
- E3 = Chyba topného tělesa → Topné těleso bez napájení.
- E4 = Chyba ventilátoru → Ventilátor se neroztočil.
- E5 = Zaseknutí programu → V programu došlo k zaseknutí a k následnému resetu.
- E6 = Příliš velký rozdíl mezi teplotami termočlásků → Nerovnoměrnost ohřevu.

### Kódy předčasného ukončení pájení či sušení

Při přerušení pájení nebo sušení se na displeji objeví číselný kód signalizující důvod přerušení. Kódy jsou vysvětleny níže.

- 1 = Ukončení uživatelem → Přerušení procesu zásahem uživatele.
- 2 = Otevřené víko → Přerušení procesu otevřením víka pece.
- 3 = Termočlásky → Přerušení procesu z důvodu chyby obou termočlásků.
- 4 = Topné těleso → Přerušení procesu chybou topného tělesa.
- 5 = Ventilátor → Přerušení procesu chybou ventilátoru.
- 6 = Příliš velký rozdíl reálné teploty od žádané → Přerušení kvůli příliš rozdílné teplotě.
- 7 = Příliš velký rozdíl mezi teplotami termočlásků → Přerušení kvůli nerovnoměrnosti ohřevu.

### Chyby termočlásků


Chybný kód termočlásků lze nalézt v sekci diagnostika → termočlásky. Je zde posloupnost osmi čísel pro každý ze dvou termočlásků. Nula v čísle znamená bez chyby. Jednička v čísle znamená chyba. Význam jednotlivých pozic je níže.

Kód: (bez chyb)	0	0	0	0	0	0	0	0
Pozice:	7	6	5	4	3	2	1	0

Pozice:

- 0 → Přerušený termočlásek.
- 1 → Chyba přepětí nebo podpětí vstupu termočlásku.
- 2 → Teplota termočlásku pod 0 °C.
- 3 → Teplota termočlásku přes 400 °C.
- 4 → Teplota studeného spoje pod 0 °C.
- 5 → Teplota studeného spoje přes 80 °C.
- 6 → Teplota termočlásku mimo měřitelný rozsah.
- 7 → Teplota studeného spoje mimo rozsah -50 °C až 125 °C.

## 13 Řešení problémů

Tabulka níže popisuje několik základních problémů, které mohou při užívání pece nastat. K problémům je zde přiřazena nejčastější příčina a možnost řešení. Některá řešení může provést uživatel, ovšem řešení s označeným symbolem  vždy ponechte na odborném servisu. Pokud se nepovede závadu odstranit základními popsányými úkony, obraťte se na odborný servis.

Popis problému	Možná příčina	Možné řešení
Po zapnutí hlavního vypínače se pec nespustí.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Absence napájení.</li> <li>Porucha spínaného zdroje.</li> <li>Porucha mikroprocesoru.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte, zda je přívodní kabel zapojený.</li> <li>Zkontrolujte nízkonapěťové napájení. </li> <li>Přeprogramujte mikroprocesor. </li> </ul>
Pájené spoje jsou špatně zapájené.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Špatné nastavení pece.</li> <li>Vadný prvek v peci.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proveďte nastavení.</li> <li>Proveďte diagnostiku funkcí.</li> </ul>
V průběhu pájení se pec vypne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kolísání napětí.</li> <li>Vadný nízkonapěťový zdroj.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte, zda nejsou v rozvodné síti přítomny mikro výpadky.</li> <li>Zkontrolujte a případně vyměňte 12V zdroj. </li> </ul>
Displej se spustí ale nepracuje správně.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vadný mikroprocesor.</li> <li>Chyba komunikace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Přeprogramujte firmware. </li> <li>Vyměňte mikroprocesor. </li> </ul>
Chyba E1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poškození termočlásku 1.</li> <li>Rozsah teplot mimo meze.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Přeneste pec do místnosti s pokojovou teplotou a nechte ji zde po dobu 30 min.</li> <li>Vyměňte poškozený termočlánek 1. </li> </ul>
Chyba E2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poškození termočlásku 2.</li> <li>Rozsah teplot mimo meze.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Přeneste pec do místnosti s pokojovou teplotou a nechte ji zde po dobu 30 min.</li> <li>Vyměňte poškozený termočlánek 2. </li> </ul>
Chyba E3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Poškozené topné těleso.</li> <li>Prasklá pojistka.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte topné těleso a případně narovnejte závity topného drátu.</li> <li>Vyměňte pojistku za stejný typ.</li> </ul>
Chyba E4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ventilátor je zablokovaný.</li> <li>Elektromotor nefunguje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte plynulý chod ventilátoru.</li> <li>Vyměňte elektromotor. </li> </ul>
Chyba E5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Program se zasekl.</li> <li>Chyba v paměti.</li> <li>Chyba ve firmware.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pokuste se nastolit stejné podmínky, při kterých došlo k chybě, a chybu vyvolat znovu. Pokud se to povede, informujte výrobce.</li> <li>Přeprogramujte firmware. </li> <li>Vyměňte mikroprocesor. </li> </ul>
Chyba E6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vadný termočlánek.</li> <li>Netěsnost komory.</li> <li>Nefunkční ventilátor.</li> <li>Špatné nastavení.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte těsnost komory a stav izolace.</li> <li>Zkontrolujte termočlásky.</li> <li>Zkontrolujte ventilátor.</li> <li>Zkontrolujte nastavení pece.</li> </ul>
Přerušení procesu kód 1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uživatel ukončil proces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pokud jste tak neučinili, kontaktujte servis.</li> </ul>
Přerušení procesu kód 2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nefunkční elektromagnety.</li> <li>Násilné otevření.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zkontrolujte funkci elektromagnetů.</li> <li>Vyměňte elektromagnety. </li> <li>Nedovolte obsluhovat pec neproškoleným osobám.</li> </ul>

Přerušení procesu kód 3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oba termočlánky jsou poškozeny.</li> <li>• Teploty mimo rozsah.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte termočlánky.</li> <li>• Vyměňte termočlánky. </li> <li>• Nechte pec při pokojové teplotě.</li> </ul>
Přerušení procesu kód 4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poškozené topné těleso.</li> <li>• Prasklá pojistka.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte topné těleso a případně narovnejte závity topného drátu.</li> <li>• Vyměňte pojistku za stejný typ.</li> </ul>
Přerušení procesu kód 5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ventilátor je zablokovaný.</li> <li>• Elektromotor nefunguje.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte plynulý chod ventilátoru.</li> <li>• Vyměňte elektromotor. </li> </ul>
Přerušení procesu kód 6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vadné topné těleso.</li> <li>• Špatně nastavené parametry regulace.</li> <li>• Nefunkční ventilátor.</li> <li>• Poškozené termočlánky.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte topné těleso.</li> <li>• Přenastavte parametry.</li> <li>• Zkontrolujte plynulý chod ventilátoru.</li> <li>• Zkontrolujte termočlánky.</li> </ul>
Přerušení procesu kód 7.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vadný termočlánek.</li> <li>• Netěsnost komory.</li> <li>• Nefunkční ventilátor.</li> <li>• Špatné nastavení.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte těsnost komory a stav izolace.</li> <li>• Zkontrolujte termočlánky.</li> <li>• Zkontrolujte ventilátor.</li> <li>• Zkontrolujte nastavení pece.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 0.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Termočlánek je přerušený.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyměňte termočlánek. </li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 1.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Na termočlánek se dostalo vysoké napětí.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte, že se termočlánek nedotýká topného tělesa.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 2.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• V peci je teplota pod bodem mrazu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Přemístěte pec do místnosti s pokojovou teplotou.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 3.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pec se přehřála.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte nastavení parametrů.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 4.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pájení probíhá při okolní teplotě pod bodem mrazu.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Přemístěte pec do místnosti s pokojovou teplotou.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 5.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektronika pece se přehřála.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Přemístěte pec do místnosti s pokojovou teplotou.</li> <li>• Vyčistěte chladicí otvory.</li> <li>• Zkontrolujte chod ventilátoru chlazení elektroniky.</li> <li>• Zkontrolujte, zda nejsou blokovány ventilační otvory.</li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 6.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poškozený termočlánek.</li> <li>• Termočlánek se dotýká topného tělesa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkontrolujte funkci termočlátku.</li> <li>• Zkontrolujte umístění termočlátku.</li> <li>• Vyměňte termočlánek. </li> </ul>
Chyba termočlátku na pozici 7.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poškozený senzor teploty na řídicí desce.</li> <li>• Chyba komunikace.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyměňte poškozený senzor. </li> <li>• Zkontrolujte ISP komunikace. </li> </ul>

## 14 Záruka

Pájecí pec je dodávána s omezenou zárukou, která pokrývá výrobní vady a poruchy způsobené vadným materiálem nebo zpracováním. Podmínky záruky jsou následující:

### **Délka záruky**

Standardní záruka na zařízení činí 24 měsíců od data nákupu. Záruka se vztahuje pouze na původního kupujícího a není přenosná.

### **Co záruka pokrývá**

Výrobní vady funkce, součástí a materiálů. Poruchy způsobené chybou v konstrukci nebo vadným zpracováním. Opravy nebo výměnu vadných komponent prováděné autorizovaným servisem.

### **Co záruka nepokrývá**

Běžné opotřebení součástí způsobené standardním provozem. Poškození způsobené nesprávnou instalací, používáním v rozporu s návodem nebo nedodržáním doporučené údržby. Mechanická poškození, úpravy nebo neautorizované opravy zařízení. Poškození způsobené nesprávným napájením, přepětím nebo vnějšími vlivy (např. požár, voda, chemikálie).

### **Postup při uplatnění záruky**

V případě závady kontaktujte prodejce nebo autorizovaný servis a poskytněte podrobnosti o problému. K reklamaci je nutné předložit doklad o koupi. Výrobce nebo autorizovaný servis posoudí oprávněnost reklamace a rozhodne o opravě, výměně nebo jiném způsobu řešení. Záruční podmínky se řídí platnými právními předpisy a mohou se lišit podle regionu. Pro podrobnosti se obraťte na svého prodejce.

## 15 Likvidace

Nevhazujte přístroj do domovního odpadu, ale odevzdejte jej do příslušného sběrného místa tříděného odpadu.

Změny ve verzích

20/04/2025 – První verze dokumentu.

20/04/25

Matyáš Buryanec – Pájecí pec; UPCE FEI 2025  
Technické změny vyhrazeny.

19