

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**PÁJECÍ DESKA**

Lukáš Maděra

Bakalářská práce  
2017

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Maděra**  
Osobní číslo: **I13066**  
Studijní program: **B2646 Informační technologie**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Pájecí deska**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Úkolem práce je vytvořit měřicí a řídicí jednotku pro vyhřívanou desku pro pájení SMD součástek tak, aby dodržovala předepsané teplotní profily. Teoretická část bude obsahovat popis problematiky pájení, možnosti jednoduché regulace tepelné soustavy, měření teploty v řádu 0-400C, možnosti řízení výkonu pece připojené na síťové napětí s ohledem na minimalizaci rušení. Praktická část bude obsahovat návrh a realizaci regulátoru teploty na mikroprocesoru schopného dodržet teplotní profil pájecího cyklu daný katalogovým listem pájecí pasty, regulátor bude obsahovat uživatelské rozhraní umožňující alespoň základní nastavení, bude umožňovat spustit pájecí cyklus, případně možnost přepnutí na udržování konstantní teploty.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Kreidl M.; Měření teploty - senzory a měřicí obvody, BEN, ISBN 80-7300-145-4**  
**No clean solder paste. Technical datasheet [online] Dostupný z WWW:**  
**[http://www.koki.org/Files/pdf/Paste/T\\_SE\(S\)48-M955.pdf](http://www.koki.org/Files/pdf/Paste/T_SE(S)48-M955.pdf)**  
**ŠULC B.; VÍTEČKOVÁ M.; Teorie a praxe návrhů regulačních obvodů, ČVUT,**  
**ISBN 80-01-03007-5**  
**RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN**  
**0-12-752184-4**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rozsival**

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

**24. listopadu 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**12. května 2017**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. prosince 2016

## **Prohlášení**

Tuto práci 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., autorský zákon, 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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 7.12. 2017

Lukáš Maděra

### **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Rozsivalovi za jeho trpělivost, odbornou konzultaci a všeobecné rady, jak postupovat při zpracování této práce.

V Pardubicích dne 7. 12. 2017

Lukáš Maděra

## **ANOTACE**

*Cílem mé práce je návrh a realizace pájecí desky, která je řízena mikroprocesorem ATmega88A od firmy Atmel. Deska plošných spojů obsahuje řídicí mikropočítač, dva převodníky A/D s možností připojením dvou termočlánků pro měření teploty na desce plošných spojů a druhý na horké desce. LED diody indikují správný běh programu, celý proces je zobrazen na LCD displeji. Spínání zátěže je provedeno polovodičovým relé, které eliminuje rušení.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*regulace, teplotní profily, pájecí pasta, teplota, regulátor.*

## **TITLE**

*SOLDERING HOTPLATE*

## **ANNOTATION**

*The goal of my work is to design and implementation of soldering, which is controlled by a microprocessor ATmega88A form company Atmel. The circuit board contains a microprocessor, two A/D converters with connection thermocouples for measuring the temperature, one on the circuit board and the second on the hotplate. The LED diodes indicate the correct running of program and the whole process is displayed on the LCD. Load switching is done with a semiconductor relay which eliminates interference.*

## **KEYWORDS**

*Regulation, Temperature profiles, Solder past, Temperature, Regulator.*

# OBSAH

|   |    |
|---|----|
| Seznam zkratk a značek .....                      | 9  |
| Seznam symbolů, proměnných veličin a funkcí ..... | 10 |
| Seznam ilustrací .....                            | 11 |
| Seznam tabulek .....                              | 13 |
| ÚVOD .....  | 14 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST .....                           | 15 |
| 1.1 Teplota .....                                 | 15 |
| 1.2 Teplotní stupnice.....                        | 15 |
| 1.3 Pájení.....                                   | 16 |
| 1.3.1 Pájení klasické (THT) .....                 | 17 |
| 1.3.2 Pájení povrchové (SMT).....                 | 17 |
| 1.4 Teplotní profily .....                        | 18 |
| 1.4.1 Předehřívací zóna.....                      | 19 |
| 1.4.2 Teplotní prohřívání .....                   | 19 |
| 1.4.3 Přetavení.....                              | 20 |
| 1.4.4 Ochlazování .....                           | 21 |
| 1.5 Složení používaných pájek.....                | 21 |
| 1.5.1 Olovnaté pájky .....                        | 21 |
| 1.5.2 Bezolovnaté pájky.....                      | 23 |
| 1.6 Porovnání .....                               | 24 |
| 1.6.1 Porovnání teorie s reálnými hodnotami ..... | 24 |
| 1.6.2 Srovnání past.....                          | 26 |
| 1.6.3 Srovnání pájecích pecí .....                | 28 |
| 1.6.4 Měření teploty.....                         | 32 |
| 2 PRAKTICKÁ ČÁST.....                             | 34 |
| 2.1 Použité komponenty.....                       | 36 |
| 2.1.1 Mikro počítač ATmega88A .....               | 37 |
| 2.1.2 ISP konektor.....                           | 40 |
| 2.1.3 LCD displej .....                           | 43 |
| 2.1.4 Převodník MAX6675ISA+ .....                 | 45 |
| 2.1.5 Polovodičové relé.....                      | 49 |

|       |                          |    |
|-------|--------------------------|----|
| 2.1.6 | PID regulátor.....       | 50 |
| 2.1.7 | Finální model .....      | 50 |
| 2.2   | Regulační pochody.....   | 52 |
|       | ZÁVĚR .....              | 60 |
|       | POUŽITÁ LITERATURA ..... | 61 |
|       | PŘÍLOHY .....            | 63 |



## SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

|           |  |
|-----------|--|
| D         | derivační složka   |
| DPS       | deska plošných spojů   |
| EMC       | elektromagnetická kompatibilita                                |
| EMS       | elektromotorická síla  |
| EU        | Evropská unie  |
| FCT       | funkční test   |
| HAL(HASL) | povrchová úprava DPS před pájením (pocínování pájecích plošek) |
| I         | integrační složka  |
| I2C       | počítačová sériová sběrnice vyvinuta firmou Philips            |
| ICT       | vnitřní test obvodu  |
| IO        | integrovaný obvod  |
| ISP       | sériová sběrnice pro programování mikroprocesoru               |
| K         | Kelvinova stupnice   |
| MCU       | mikroprocesor  |
| OI        | optická kontrola   |
| OZ        | operační zesilovač   |
| P         | proporcionální složka  |
| PC        | počítač  |
| PID       | proporcionálně integračně-derivační regulátor                  |
| RGB       | trojbarevná LED dioda  |
| SMD       | součástky určené pro povrchovou montáž (Surface Mount Device)  |
| SMT       | technologie povrchové montáže (Surface Mount Technology)       |
| SPI       | sériové periferní rozhraní                                     |
| THT       | klasické pájení  |
| USART     | synchronní/asynchronní sériová sběrnice                        |
| USB       | univerzální sériová sběrnice                                   |
| uC        | mikrokontrolér   |

## SEZNAM SYMBOLŮ, PROMĚNNÝCH VELIČIN A FUNKCÍ

|            |  |
|------------|--|
| $\Delta U$ | rozdílové napětí, mV                                 |
| $a$        | amplituda sinusovky                                  |
| $F_s$      | přenos soustavy                                      |
| $K_R$      | proporcionální zesílení                              |
| $M$        | amplituda spínání relé                               |
| ppm        | dílky na jeden milión                                |
| $Q_1$      | teplo dodané soustavě, J                             |
| $Q_2$      | teplo uvolněné soustavou, J                          |
| $r_d$      | derivační zesílení                                   |
| $r_i$      | integrační zesílení                                  |
| $r_k$      | kritické zesílení                                    |
| $r_0$      | proporcionální zesílení                              |
| $s$        | Laplaceův operátor                                   |
| $T_1$      | teplota 1, °C  |
| $T_2$      | teplota 2, °C  |
| $T_D$      | derivační časová konstanta, s                        |
| $T_I$      | integrační časová konstanta, s                       |
| $T_k$      | kritická perioda, s                                  |
| $W$        | celková práce, kterou soustava během cyklu vykoná, J |
| $\eta$     | účinnost Carnotova stroje, %                         |
| $\pi$      | Ludolfovo číslo                                      |

## SEZNAM ILUSTRACÍ

|  |    |
|--|----|
| Obr. 1.1 – Teplotní stupnice .....                                   | 16 |
| Obr. 1.2 – Špatný vs. dobrý spoj.....                                | 17 |
| Obr. 1.3 – Nepájivá maska.....                                       | 18 |
| Obr. 1.4 – Teplotní profil metodou přetavení .....                   | 18 |
| Obr. 1.5 – Diagram PbSn.....   | 22 |
| Obr. 1.6 – Porovnání olovnaté a bezolovnaté pájky .....              | 22 |
| Obr. 1.7 – Velikost smáčecích úhlů podle povrchu .....               | 23 |
| Obr. 1.8 – Grafické porovnání naměřených dat.....                    | 26 |
| Obr. 1.9 – Srovnání bodů tání.....                                   | 28 |
| Obr. 1.10 – Termočlánek .....  | 32 |
| Obr. 2.1 – Schéma regulátoru .....                                   | 34 |
| Obr. 2.2 – Board regulátoru .....                                    | 35 |
| Obr. 2.3 – Dolní pohled desky regulátoru .....                       | 36 |
| Obr. 2.4 – Horní pohled desky regulátoru .....                       | 36 |
| Obr. 2.5 – SMD pouzdro mikropočítače a názvy jednotlivých pinů ..... | 37 |
| Obr. 2.6 – Vnitřní blokové uspořádání mikropočítače .....            | 39 |
| Obr. 2.7 – Nastavení portu.....                                      | 39 |
| Obr. 2.8 – Schéma zapojení obvodu ATmega88A .....                    | 40 |
| Obr. 2.9 – Programátor AVR ISP .....                                 | 41 |
| Obr. 2.10 – ISP programovací konektor .....                          | 42 |
| Obr. 2.11 – LCD displej.....   | 43 |
| Obr. 2.12 – Zahájení komunikace I2C.....                             | 44 |
| Obr. 2.13 – Pouzdro převodníku pro termočlánek.....                  | 45 |
| Obr. 2.14 – Komunikace pro sběrnici SPI.....                         | 47 |
| Obr. 2.15 – Převodník pro termočlánek.....                           | 48 |
| Obr. 2.16 – Konektor pro USART.....                                  | 48 |
| Obr. 2.17 – Schéma polovodičového relé.....                          | 49 |
| Obr. 2.18 – Popis zkratk pro polovodičové relé .....                 | 50 |
| Obr. 2.19 – 3D pohled na desku s komponenty .....                    | 51 |
| Obr. 2.20 – Kód jednoduché regulace .....                            | 52 |
| Obr. 2.21 – Relé ve zpětné vazbě .....                               | 53 |
| Obr. 2.22 – Relé ve zpětné vazbě-přiblížení.....                     | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Obr. 2.23 – Nastavení žádané hodnoty .....  | 54 |
| Obr. 2.24 – Nastavení žádané hodnoty – přiblížení.....                                  | 55 |
| Obr. 2.25 – Kód nastavení P složky.....   | 55 |
| Obr. 2.26 – Nastavení půlvln .....  | 56 |
| Obr. 2.27 – Regulační pochod z 20 °C na 70 °C s P složkou a překmitem o cca 15 °C ..... | 57 |
| Obr. 2.28 – Regulační pochod s P složkou – přiblížení.....                              | 57 |
| Obr. 2.29 – Rampování, sledování žádané hodnoty .....                                   | 58 |
| Obr. 2.30 – Nástřel pájecího profilu .....  | 58 |
| Obr. 2.31 – Reálný pájecí profil .....  | 59 |

## SEZNAM TABULEK

|  |    |
|--|----|
| Tab. 1.1 – Měřená a ideální data.....                      | 25 |
| Tab. 1.2 – Srovnání pájecích past od různých výrobců ..... | 27 |
| Tab. 1.3 – Srovnání pájecích dávkových pecí .....          | 29 |
| Tab. 1.4 – Srovnání pájecích kontinuálních pecí.....       | 30 |
| Tab. 2.1 – Funkce ATmega88A.....                           | 38 |
| Tab. 2.2 – Led programátor AVR ISP .....                   | 41 |
| Tab. 2.3 – Tabulka pinů ISP konektoru .....                | 42 |
| Tab. 2.4 – Tabulka pinů LCD displeje.....                  | 43 |
| Tab. 2.5 – Tabulka pinů převodníku MAX6675ISA+.....        | 46 |

# ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem regulátoru, který řídí topnou desku pro pájení osazených desek DPS automaticky na základě uživatelem předem navolených teplotních profilů. V rámci zadané práce bylo potřeba navrhnout řešení pomocí PID regulátoru s regulací a ovládním napájecího napětí pro topnou desku pomocí relé.

Práce je rozdělena do tří částí, kde se v první věnují teoretickému popisu problematiky, a to teplotě obecně. Dále se v této části věnuje pozornost průmyslově používaným pájecím pastám a jejich vlastnostem.

V druhé kapitole se v první části zabývá návrhem samotného regulačního obvodu, použitými součástkami pro osazení DPS a samotným návrhem DPS. Jako další je v této části zmíněna elektromagnetická kompatibilita (EMC) a přizpůsobení jí samotného návrhu. Celý návrh je realizován s ohledem na nízkou ekonomickou zátěž a konstrukční jednoduchost.

V druhé části této kapitoly se jedná o popis a vysvětlení regulačních pochodů, na jejichž základě byl nastavován PID regulátor, pro který byl použit uC řady ATmega88A.

Výsledkem samotné práce bylo navržení potřebného automatizovaného systému pro pájení DPS osazených technologií SMD, kde si uživatel vybere požadovaný teplotní pájecí profil dle použité pájecí pasty a celý proces se sám automaticky provede bez dalšího zásahu uživatele.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 TEPLOTA

Teplota je fyzikální veličina, která se dá měřit téměř u každého tělesa. Těleso může být jednoznačně definované svou délkou, hmotností, ale také svou teplotou, kterou vyzařuje. Teplotu tělesa je možné stanovit třemi stavy, chladné, teplé, a horké s ohledem na teplotu okolí, ve kterém se nachází (buď je teplejší než okolí, nebo naopak).

Definice teploty může být formulována takto: „*Teplota je vlastnost těles apod., vyznačující se schopností odevzdat nebo odvésti nějaké množství tepla nebo chladu (resp. negativního tepla) na těleso jiné.*“ (Šindelář, 1955) Pro měření kvantitativního množství teploty je předpoklad takový, že se mění všechny jejich fyzikální vlastnosti. Lze je dělit do několika skupin

- změna přírůstku na délce,
- změna tlaku látky v uzavřeném prostoru,
- změna elektrického odporu vodiče,
- kvalitu a množství tepelného záření,
- změna skupenství atd.

Díky těmto změnám, které nám mohou pomoci změřit teplotu tělesa, je třeba stanovit podle společného, jednotného měřítko tzv. teplotní stupnici (Šindelář, 1955).

## 1.2 TEPLITNÍ STUPNICE

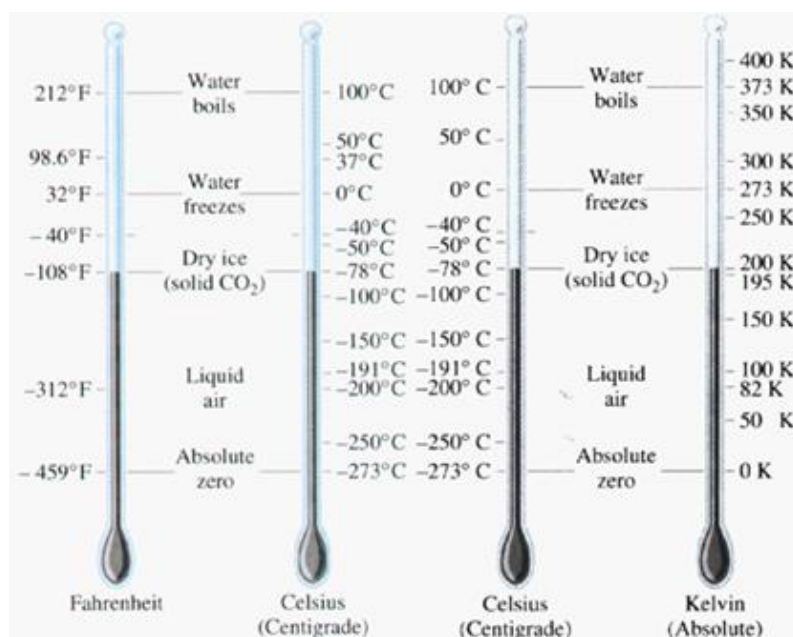
Teplotní stupnici lze chápat jako vzájemné porovnání měřené hodnoty vyjádřené různými metodami, které můžeme mezi sebou ověřovat tak, aby byla stupnice co nejdokonalejší. Tomu nejlépe odpovídá tzv. termodynamická stupnice určená reverzním termodynamickým strojem, tzv. Carnotův cyklus. Účinnost stroje v ideálním stavu je dána vztahem

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (1.1)$$

kde  $Q_1$  – je teplo dodané soustavě ve fázi izotermické expanze, J,  
 $Q_2$  – je teplo uvolněné soustavou izotermické kompresi, J,  
 $W$  – je celková práce, kterou soustava vykoná během cyklu, J.

Carnotův stroj je periodicky se opakující cyklus složený ze čtyř procesů pro ideální stroj. Prvním procesem je adiabatické stlačení, následuje izotermické rozpínání, adiabatické rozpínání a izotermické stlačování (Šindelář, 1955).

Existuje několik teplotních stupnic, ale nejpoužívanější jsou Celsiova, Fahrenheitova a Kelvinova. Samotná Kelvinova stupnice je určena pro měření termodynamické teploty, která je veličinou SI a její jednotku značíme písmenem K. Obr. 1.1 ukazuje vzájemnou korelaci mezi těmito stupnicemi.

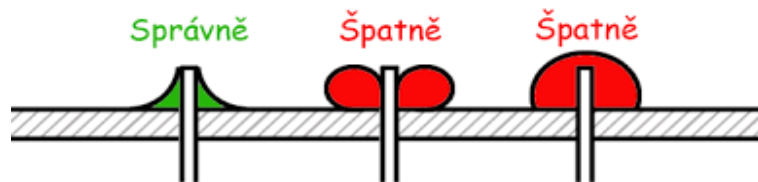


Obr. 1.1 – Teplotní stupnice (What is the relationship between..., 2016)

### 1.3 PÁJENÍ

Dnešní doba si při osazování DPS žádá stále vyšší rychlost zpracování při zachování úrovně kvality, na níž jsou kladeny velmi vysoké nároky. Bohužel se na trh i přes přísnou výstupní kontrolu (ICT, FCT, Flying probes, OI) občas dostanou osazené desky, které jsou nefunkční kvůli tzv. studeným spojům. Ty vznikají tehdy, není-li dodržena teplota a doba, po kterou se má pájka dostatečně prohřát. Takové studené spoje jdou lehce okem rozpoznat, neboť pájka je mezi pájenou plochou a cínem ostře ukončená (má ostrý úhel), kdežto u dobře prohřátého spoje vidíme, jak se pájka rozlévá po osázené desce obr. 1.2.





Obr. 1.2 – Špatný vs. dobrý spoj (Pájení, 2017)

Rozlišujeme dva druhy pájení, a to klasické (THT) a povrchové (SMT). Tato práce je zaměřena především na metodu povrchové montáže, ale i přesto bude zmíněna klasická metoda spolu s jejím použitím.

### 1.3.1 Pájení klasické (THT)

Klasické vývodové pájení se stále používá z několika důvodů. Jedná se například o „bastlení“ (radioamateurinu), kdy je klasické ruční osazování jednodušší. Dále není v současnosti možné konstrukční řešení miniaturních SMD pro vysoké proudové, napěťové, kapacitní, teplotní aj. hodnoty.

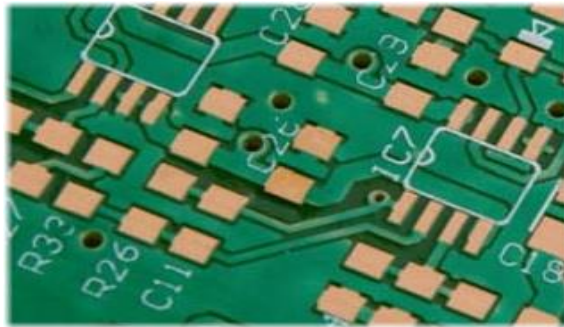
V průmyslu se tato metoda transformovala na tzv. pájení vlnou, které lze použít i na povrchové pájení.

### 1.3.2 Pájení povrchové (SMT)

SMT pájení představuje povrchovou montáž součástek přímo na povrch DPS, kdy je na pájené spoje nanášena tzv. pájecí pasta. Jedná se o lepkavou směs s drobnými částicemi pájky, která je přímo aplikovaná na potřebné body – spoje. Při použití této metody je lepší, když je samotná DPS ošetřena nepájkivou maskou, aby se nevyzkratovaly/neporušily vodivé cesty – v nepájkivé masce jsou otvory nad pájkivými ploškami pro umístění součástek. Tato metoda je však doporučena u desek vyšších konstrukčních tříd pro všechny metody pájení. Takto připravená deska se osází SMD součástkami, které mohou být už připraveny v papírových páskách (automatické osazování). Deska se následně zahřívá na požadovanou teplotu podle použité pájecí pasty tak, aby došlo k rozliti pasty a zapájení součástky. DPS je možné ohřívat několika bezkontaktními způsoby, a to přes tzv. reflow pec, infračervenou lampu nebo pomocí horkovzdušné pájecí stanice.

Reflow pájení je nejčastější způsob povrchové montáže desky. I přesto, že se pájení vlnou zdá levnější a jednodušší, pro desku obsahující směs SMD a THT komponentů je tento způsob méně nákladný na montáž. To z toho důvodu, že odpadá pracnější osazování desky

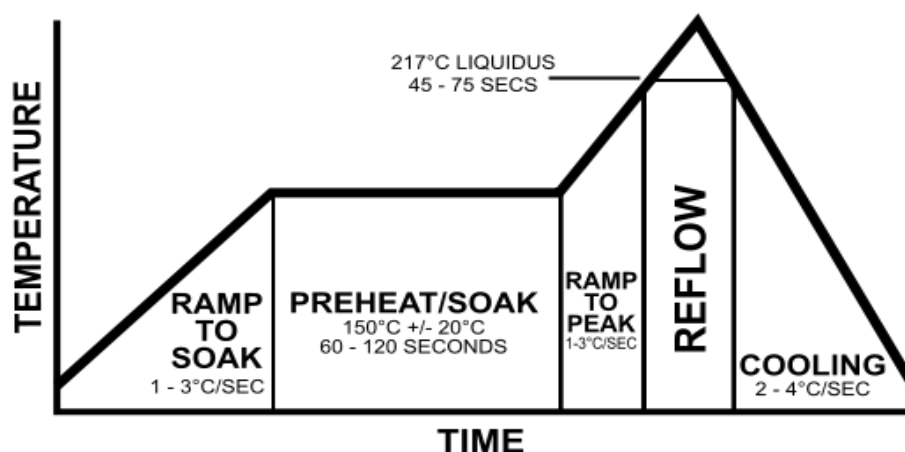
komponenty s drátovými vývody, které pak můžeme pájet vlnou. V konvenčním způsobu pájení přetavením bývají 4 kroky (zóny), jež mají určitý teplotní profil. Jsou to předehřátí, teplotní prohřívání, přetavení a chlazení viz obr. 1.4. Hlavním úkolem tohoto procesu je nepoškodit osazené citlivé elektrické součástky (Reflow soldering, 2001; Surface-mount technology, 2001).



Obr. 1.3 – Nepájivá maska (Jak na nepájivou desku ..., 2009)

## 1.4 TEPLITNÍ PROFILY

Pájecí technologie Reflow soldering je řízena podle teplotních profilů, které je třeba splnit v následujícím pořadí. Pájení přetavením je proces, kdy je pájecí pasta (složená z tavidla a práškové pájky) použita pro spojení jednoho nebo několika elektrických komponentů k desce plošných spojů, buď dočasně, nebo natrvalo. Přitom při technologii SMT dochází k zahřátí celé desky i s SMD komponenty.



Obr. 1.4 – Teplotní profil metodou přetavení (Reflow soldering profiles, 2015)

### 1.4.1 Předehřívací zóna

Během této fáze je celá deska zahřívána až na požadovanou teplotu cca 150 °C a během této doby je současně nanášena pájecí pasta. V tomto stavu je ponechána od 60 s do 120 s. Cílem této fáze je dostat desku do bezpečného a trvalého stavu prohřátí/předehřívání. Tato fáze je také potřebná pro uvolnění těkavých rozpouštědel, které pájka obsahuje. Z důvodu oddělení použitých rozpouštědel v pájce a zároveň udržení teplot pro re-flow musí být deska ohřívána konzistentním lineárním způsobem. V první řadě při přetavení hraje roli teplota a rychlost sklonu nebo naopak nárůst teploty v závislosti na čase. Teplota působící při procesu pájení desky je měřena ve stupních Celsia za sekundu, °C/s, a při zvyšování teploty na abnormální vůči svému okolí se můžou projevit vlastnosti, jako jsou například doba konečného zpracování (rychlost chladnutí), těkavost pájecí pasty a použité komponenty. Tyto vlastnosti je dobré neopomínat, jelikož mohou výrazně ovlivňovat pájecí cyklus, zejména pokud se jedná o použití citlivých komponentů, které jsou na prvním místě. K praskání citlivých komponentů by došlo při příliš rychlé změně teploty při procesu. Ovšem, pokud jsou použity komponenty odolávající rychlé změně teploty při procesu, a tudíž mají teplotní propustnost ne zrovna moc ideální (méně náchylné na teplotu), může být teplotní sklon upraven s cílem ke zlepšení doby zpracování. Proto se mnoho výrobců snaží tlačit rychlost míry sklonu až do maximální možné míry, a tou je až o 3 °C/s. Pokud použijeme pájku obsahující silná rozpouštědla, vytvoří se při příliš silném zahřátí výstupní kontrolovaný proces. Použijeme-li těkavá rozpouštědla typu outgas, tato mohou stříkat pájku z ploch na desce. Jakmile je deska na konci fáze předehřátí/prohřátí a podle grafu je rampována, nastává zóna teplotního prohřátí (Reflow soldering, 2001).

### 1.4.2 Teplotní prohřívání

Tzv. Thermal soak zone tvoří druhou část tepelného prohřívání. Jeho čas trvání je typicky od 60 s do 120 s, což je čas nezbytný pro odstranění těkavých látek obsažených v pájecí pastě a pro aktivaci (rozlití) tavidla. Musíme ovšem brát v potaz, že příliš vysoká teplota může vést k rozstříkání pájky nebo hrudkovatění, jakož i oxidaci pasty. Proto je hlídání teploty (měření) užitečné vzhledem k použití, kde s příliš nízkou teplotou tavidla nemusí být pájka plně funkční, ale jak bylo řečeno, ani naopak nelze teplotu příliš zvyšovat přes danou hranici. Po ukončení tohoto procesu, tedy na konci tepelného prohřátí, je celá deska v teplotní rovnováze, než se přistoupí k další zóně. Důvodem návrhu tohoto teplotního profilu

je předejití teplotním změnám ( $\Delta T$ ) mezi různými velikostmi pouzder použitých součástek. Poté následuje další zóna Reflow zone (Reflow soldering, 2001).

### 1.4.3 Přetavení

Třetí část z celého procesu teplotního profilu je stav, kdy pájka přechází do tekutého stavu, který na obr. 1.4 představuje trojúhelníková část ležící nejvýše od bodu tekutého stavu pájky, díky čemuž je dosaženo nejvyšší teploty vůbec. Tato část je určena součástkami, které obsahuje pájená deska a které mají nejnižší teplotní toleranci při vysokých teplotách, tj. jsou nejvíce náchylné k poškození. Tento nejvyšší teplotní bod je maximální přípustný pro celý proces. Běžně se špičková teplota pohybuje od 20 °C do 40 °C nad kapalnou úroveň. V některých příručkách se lze dočíst, že stačí odečíst 5 °C od součástky, která je nejvíce zranitelná maximální teplotou pro maximálně správný běh procesů. Stále je potřeba dávat pozor na to, aby se teplota procesu nedostala nad 260 °C z důvodu, který byl zmiňován v pododdílu 1.4.2. Teplota však nesmí ani klesnout, došlo by totiž k neúplnému rozlití pasty. V úseku, kde po náběžné rampě s gradientem od 1 °C/s do 3 °C/s dochází k tekutému stavu pájky, tzv. liquidus, se časově měří, jak dlouho je pájka od přetavení, jež by mělo trvat pouze od 45 s do 75 s. Pokud doba ohřevu překračuje specifikace výrobce, může dojít k předčasnému spuštění procesu pájení a následně, důsledkem neefektivního postupu, k sušení pasty ještě před samotným zapájením kontaktu. Tavidlo snižuje povrchové napětí u styčných bodů kovů (smáčivost), kde se provede spojení součástky s pájecí ploškou desky. Nedostatečně dlouhá doba, nebo teplotní závislost způsobuje pokles čistícího účinku tavidla, kde dochází ke špatnému prohřátí, nedostatečnému odstranění rozpouštědla, tavidla a vadným spojům (Reflow soldering, 2001).

Tuto dobu se snažíme potlačit na minimum, ale i přesto je působnost většiny past stanovena minimální dobou 30 s. Tato skutečnost je dána tím, že je v mnoha případech zapotřebí pájet PCB větších rozměrů, a při profilu větší tloušťky desky nedojde k získání potřebného prohřátí. Proto je zde stanoveno reflow na minimální dobu 30 s. Takto dlouhá minimální doba přetavení je navržena pro bezpečnou rezervu, kdy může dojít k teplotním změnám uvnitř pece, a proto nemusíme mít o kvalitu pájení strach. Doba trvání nejvyšší části cyklu obr. 1.4 je v ideálním stavu prohřátí stanovena na 60 s, ale tento čas se nesmí příliš zkrátit, aby nedošlo ke vzniku studený spojů (Reflow soldering, 2001).

#### **1.4.4 Ochlazování**

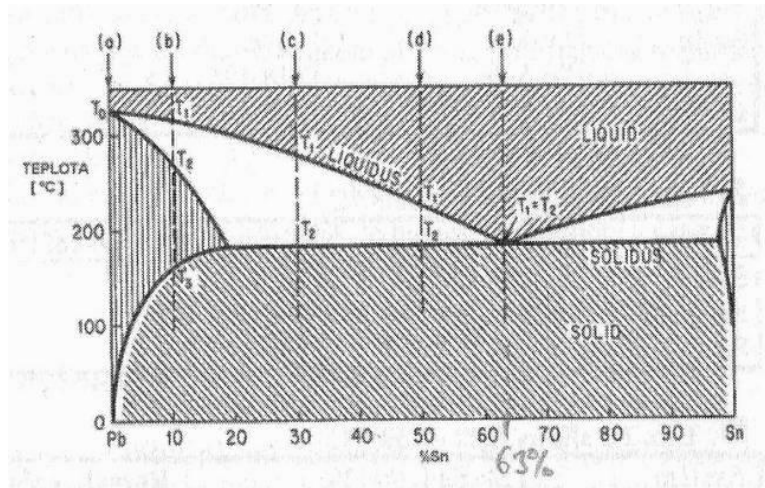
Poslední zónou je Cooling zone, česky ochlazovací zóna. Tato část slouží pro postupné ochlazování komponentů i desky PCB tak, aby nedocházelo k teplotnímu šoku. V této fázi se díky pozvolnému chladnutí vytvoří zrnkovitá struktura pájecí pasty a spoj je tudíž mechanicky spolehlivý. Teplota se v této fázi pohybuje v rozmezí od 30 °C do 100 °C. Strmost gradientu ochlazování není až tak důležitá oproti strmosti gradientu náběhu. Zde teplotní gradient dosahuje hodnot kolem 4 °C/s, což je parametr získaný při rozboru procesu (Reflow soldering, 2001).

### **1.5 SLOŽENÍ POUŽÍVANÝCH PÁJEK**

Hlavním sledovaným parametrem pájek při pájení je teplota, kterou bychom rádi, ať už z pohledu ekonomického nebo životního regulovali na co nejmenší hodnotu. Zároveň však chceme při této teplotě dosáhnout co nejideálnějšího vodivého spoje a rovnoměrně rozlití pájky. Pájení tedy můžeme dle použitých materiálů a jejich bodu tání dělit na olovnaté a bezolovnaté pájení.

#### **1.5.1 Olovnaté pájky**

Jedná se o starší způsob pájení, než je současné bezolovnaté. Pokud bychom se neohlíželi na životní prostředí, nebyl by tento princip (s použitím látky Pb) nahrazován. Ovšem v roce 2006 nabyla s účinností dne 1. 7. 2006 vyhláška č. 352/2005 Sb. ze směrnice EU RoHS pojednávající o nebezpečných odpadech, která stanovila zákaz používání látky Pb v elektrotechnice. Tento zákaz však v různých odvětvích neplatí z hlediska svých velice špičkových mechanických vlastností a nízké teploty tání (letecký, vojenský a lékařský průmysl). Pro běžnou olovenou pájku typu Sn63Pb37 je její teplota tání cca 183 °C. Životnost desky také ovlivňuje teplota procesu působící na komponenty – s vyšší teplotou klesá životnost „namáhání“ součástek. Jedná se o vznik tzv. studených spojů (vydrolení) a následnému odpadnutí od spoje větších součástek způsobené pájkou.



Obr. 1.5 – Diagram PbSn (Stoklasa, 2010)

Obr. 1.5 znázorňuje výhodu olovnaté pájky, kde dochází k tání pájky při nižší teplotě. Na svislé ose leží teplota tání použitých slitin a na vodorovné ose hmotnostní poměr kovů tvořící slitinu. „Cín má teplotu tání 232 °C, olovo 327 °C, teplota tání slitiny je závislá na hmotnostním poměru obou kovů. Slitina tuhne mezi 183 °C až asi 250 °C (rozmezí křivek solidus a liquidus). Při poměru Sn/Pb 63/37 je teplota tání slitiny jednoznačně dána (183 °C – eutektický bod) a je nejnižší. Slitina přechází při ohřevu přímo ze stavu tuhého do stavu kapalného. Při ochlazování tavenina chladne velmi rychle bez pastovité konzistence a nemá dostatek času na vytvoření velkých zrn. Vytvoří se jemnozrnná směs krystalitů obou složek. Slitina tohoto poměru se nazývá eutektická a zajišťuje i nejvyšší pevnost spoje i korozní odolnost.“ (Stoklasa, 2010)

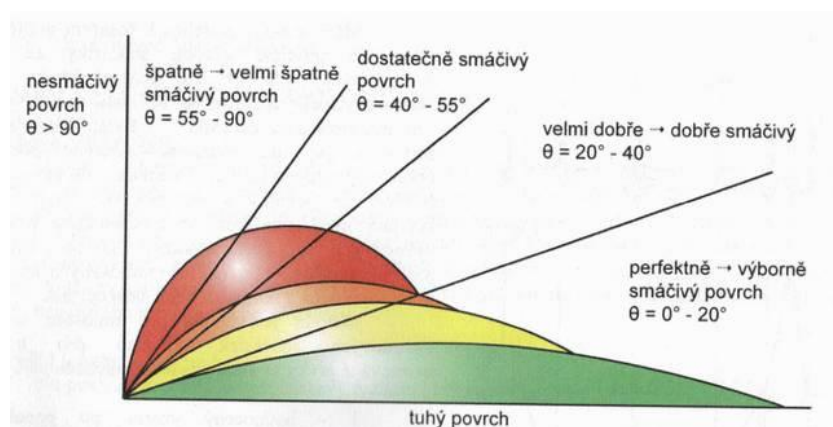


Obr. 1.6 – Porovnání olovnaté a bezolovnaté pájky (Eselai, 2013)

## 1.5.2 Bezolovnaté pájky

Důvod, proč vznikly bezolovnaté pájky, jsme si vysvětlili hned na začátku rozdělení. Pájky tohoto typu byly vyrobeny jako náhrada za olovenou pájku Sn63Pb37. Jejich náhražky bezolovnaté pájky mají bod tání cca od 195 °C do 227 °C, kdežto olovu stačí 183 °C, takže slitiny bezolovnatých pájek mají pracovní teplotu vyšší, kdy se odráží náročnost na pájedlech s vyšší teplotní regulací, ochrannou atmosférou a větší investicí do elektrotechnického průmyslu.

Moderní pájky musí obsahovat převážnou část, a to minimálně 60 % cínu, který způsobuje zvýšení bodu tání. Zbytek je nahrazován částmi drahých kovů. Vzhledem k tomu, že přetavení probíhá ve větším rozsahu teplot, jsou kladeny větší nároky na regulaci, ať už pecí (pájení přetavením, kdy lze tuto v dnešní době lépe regulovat) nebo regulace hrotu pájedla (přičtení dopravního zpoždění teploty na hrotu). U těchto pecí se doporučuje použití ochranné atmosféry s dusíkem, které eliminuje tvorbu oxidu v pájeném spoji způsobenou právě větším množstvím cínu, zlepšuje smáčivost a ve finálním postupu zajišťuje i vyšší jakost spoje. Spoje tvořené bezolovnatou pájkou jsou matněji oproti olovnaté pájce, i přesto je díky dusíku tento jev částečně potlačen (Stoklasa, 2010).



Obr. 1.7 – Velikost smáčecích úhlů podle povrchu (Stoklasa, 2010)

U bezolovnatých pájek se lehce vytvářejí tzv. kuličky pájky ve srovnání s olovnatou pájkou SnPb. Navíc příměsi v bezolovnatých pájkách mají vyšší smáčecí úhly. Při vysoké teplotě vzduchu v peci s obsaženým kyslíkem dochází k rychlejší oxidaci než za normálních podmínek. Aby se odboural tento problém, je třeba vytvořit ochrannou atmosféru N<sub>2</sub> ještě před nanášením tavidla, čímž se zmenší objem přítomného kyslíku a můžeme tak použít pasty s menším objemem tavidel (Stoklasa, 2010).

V dnešní době hojně používané pece pracují na technologii přetavení s ochrannou atmosférou, která pomáhá ke zlepšení pájených spojů a zároveň se hlídá hladina kyslíku. Tento kyslík se měří v jednotkách ppm a jedná se o jednu miliontinu (parts per million). Je to poměr jedné částice vůči celku, což je např. 1 % = 10 000 ppm.

Při velké koncentraci kyslíku v peci dochází při procesu pájení ke zrychlování oxidace spojů, což znamená, že větší obsah kyslíku = větší oxidace. Bezolovnaté technologie nemají rády vibrace (křehké spoje) a starší komponenty jsou nepoužitelné, pokud dojde ke kontaminaci bezolovnaté pájky olovem, což má za následek mechanicky nespolehlivý spoj.

Problémem je přítomnost kyslíku a v něm obsažené vlhkosti, pokud je hodnota kyslíku kolem 1000 ppm, je zlepšení už zpozorovatelné, a tím dochází k lepší smáčivosti už při hodnotě 500 ppm.

Technologie, které se používají v pecích s teplotními zónami, jsou modernizované tak, aby splňovaly obr. 1.4, podle něhož je proces funkční. To znamená, že pokud se deska dostane do oblasti, kde teplota stoupá nad 150 °C, dochází k jejímu prohnutí, a při osazování protější strany by bylo osazování obtížné. Tento centrovací mechanismus obsahují pouze zóny přetavení a ochlazování (Szendiuch, 2004).

## **1.6 POROVNÁNÍ**

Často se můžeme setkávat s výrobky s totožnými vlastnostmi a složením, ale s odlišnou např. cenou, udávanou informací pro aplikaci atd. Pododdíl 1.6.1 ukazuje rozdíl teplotních bodů, jak se liší teoretické hodnoty od reálných u konkrétního typu pájecí pasty. Pasta SnPb je nahrazena bezolovnatou pastou, a i přesto, že body nejsou zcela stejné, má bezolovnatá pasta dobré vlastnosti, které lze vidět na obr. 1.8 (Szendiuch, 2004).

Pododdíl 1.6.2 se věnuje srovnání více pájecích past, které jsou složené z různých příměsí nahrazující olovo tak, aby reálné profily byly skoro co nejvíce totožné s udávanými teoretickými hodnotami a srovnatelné s olovnatou pastou, což se také odráží i v ceně, které jsou k porovnání v tab. 1.2.

### **1.6.1 Porovnání teorie s reálnými hodnotami**

Ideální pasta je ta, která obsahuje dané množství olova. Jelikož je ale olovo k životnímu prostředí nešetrné, škodí, je zcela logicky zakázáno směrnici RoHS. Z tohoto důvodu je olovo nahrazováno jinými prvky, především vzácnými kovy. Jedná se o cín, stříbro, měď a bismut.



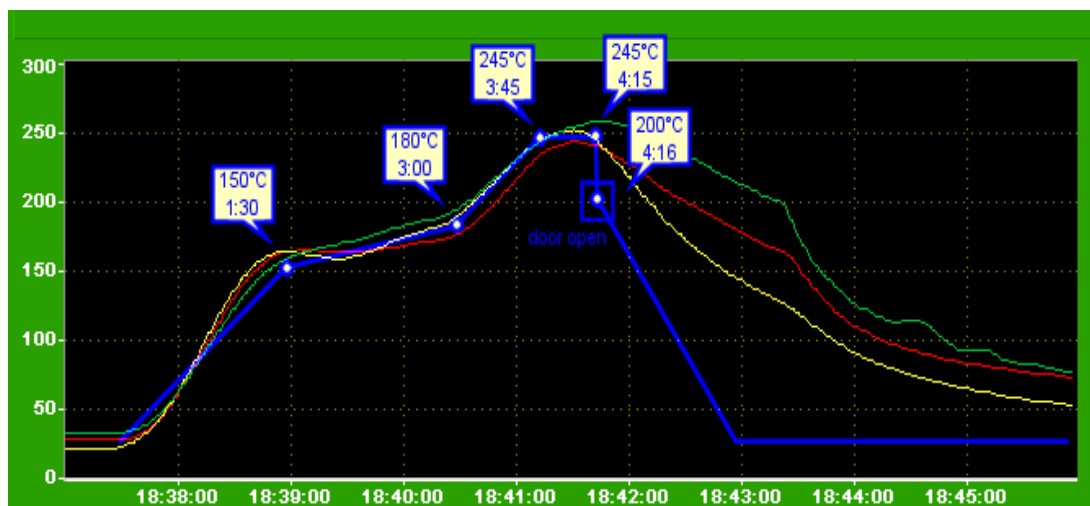
Množství koncentrace daného prvku obsažené v pájecí pastě je dáno např. konkrétní oblastí použití. Body tání u mnoha past jsou podobné, viz obr. 1.9, a to i přesto, že jsou složeny z jiných prvků. Je to dáno množstvím určité příměsi kovů obsažené mezi ostatními, které slouží pro sestavu struktury dané pájecí pasty. Jedním z velmi důležitých prvků je stříbro, jedná o vzácný ušlechtilý kov, ale jeho vlastností, kterou předčí ostatní, je to, že přináší lepší jak mechanické a přílnavostní, tak i elektrické vlastnosti, nevytváří kuličky pájky při procesu přetavení a zlepšuje smáčivost. Dalším důležitým prvkem, a na rozdíl od stříbra i cenově přijatelnějším, je kov bismut (Bi). Jeho předností je, že se díky němu dosahuje nízkého bodu tání a je vhodné pro obvody náchylné na teplotu. Jeho špatnou vlastností je zmenšení smáčivosti. Bezolovnaté pájky je třeba při procesu přetavení hlídat, protože pracují v užším rozsahu pracovních teplot oproti SnPb. Oxidace těchto past je dána tím, že jakmile se zvýší teplota tání, zvětší se tím i náchylnost na kontaminaci past. Jelikož je kladen důraz na přesnost regulace teploty při pájení, je ideální možnost hlídat DPS s více senzory.

Samotné kovy mají teploty tání mnohem vyšší, než je tomu ve slitinách. Pájka s příměsí olova a cínu Sn63Pb37 se má přehřívat tak, jak je uvedeno v tab. 1.1.

Tab. 1.1 – Měřená a ideální data (Reflow soldering profiles, 2015)

| Zóna        | Lead (Sn63 Pb37)                                 | Lead-free (SAC305)                               |
|-------------|--|--|
| Přehřívání  | na 150 °C za dobu 60 s                           | na 150 °C za dobu 60 s                           |
| Prohřátí    | ze 150 °C na 165 °C za dobu 120 s                | ze 150 °C na 180 °C za dobu 120 s                |
| Přetavení   | Teplotní špička z 225 °C na 235 °C, po dobu 20 s | Teplotní špička z 245 °C na 255 °C, po dobu 15 s |
| Ochlazování | -4 °C/s nebo volné proudění                      | -4 °C/s nebo volné proudění                      |

Jak můžeme vidět v tab. 1.1, teoretické hodnoty se od naměřených liší. To může být dáno buď velikostí desky PCB, kterou je třeba dostatečně prohřát, nebo typem pasty, která je zvolena pro pájení (Szendiuch, 2004).



Obr. 1.8 – Grafické porovnání naměřených dat (Reflow soldering profiles, 2015)

Na obr. 1.8 vidíme volně se překrývající teplotní profily, kde osa  $x$  zobrazuje čas  $t = s$  a osa  $y = °C$ . Křivka modré barvy je předepsaný profil, zobrazující ideální stav. Žlutá křivka je senzor pod deskou PCB a měří teplotu, která projde v peci skrze desku (prohřátí desky). Křivka má při náběhu ještě zanedbatelnou dobu dopravního zpoždění danou např. velikostí PCB, a následně poblíž bodu 1:30 tato křivka dosáhne překmitu, což představuje tepelnou setrvačnost soustavy. Červená křivka vykresluje teplotu nad PCB, kdy senzor není v přímém dotyku s deskou, ale je pouze těsně nad ní (čidlo je umístěno ve volném prostoru), kde se na výsledné křivce podílí i doba ohřátí vzduchu obklopující měřenou soustavu. Tuto soustavu následně kopíruje zelená křivka, jež simuluje čidlo v přímém kontaktu na desce. Lze říci, že reálný stav nevykresluje čidlo pod ani nad deskou, ale čidlo, které je přímo ve styku s deskou. Ochlazování je tzv. gradient s malou strmostí a je dán teplotní setrvačností desky, než dojde k ochlazení způsobenému otevřením dveří pece.

Tato charakteristika je pro dnes již nepoužívanou olovnatou pastu, (používá se pouze v odvětvích, jako je lékařství atd.) (Reflow soldering profiles, 2015).

## 1.6.2 Srovnání past

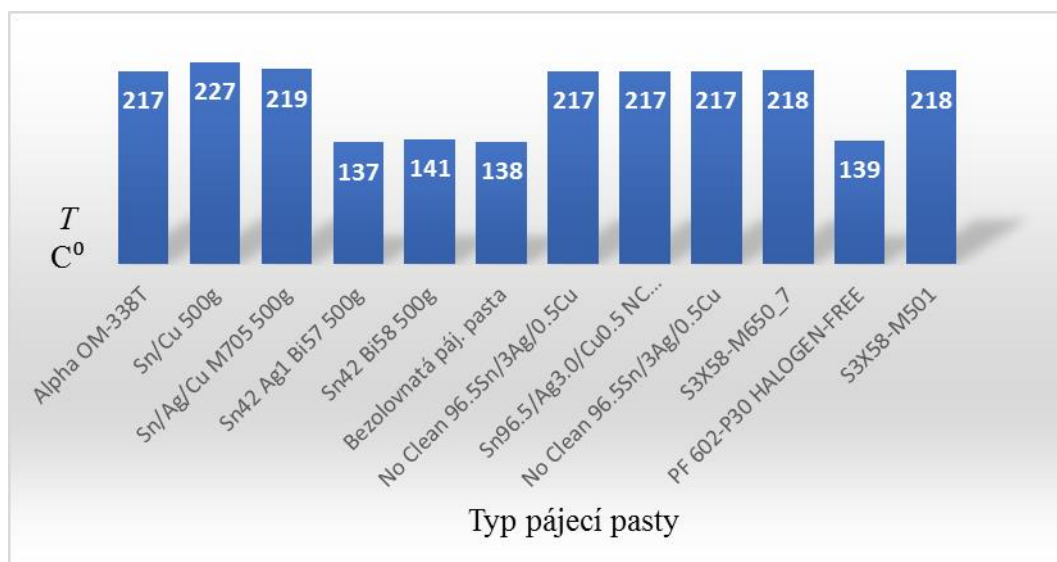
Při pájení SMT technologií je třeba použít vhodnou pájecí pastu. Pokud se bude vybírat mezi několika druhy past, je dobré vědět, co se od ní může očekávat, její vlastnosti, jako jsou např. dobré prohřátí, nízký bod tání atd. Pokud se bude volit pasta šetrná k životnímu prostředí, tedy bezolovnatá, která je nahrazována slitinami jiných kovů, budou se teplotní informace mírně lišit od informací pro olovnatou pastu, což platí i pro cenové kategorie. Zde je srovnání výrobků několika bezolovnatých past od různých výrobců, které

jsou k dostání ve vybraných e-shopech (Cínové pasty, 2017; PF 602-P30 Halogen-free solder paste, 2017; Solder paste, 2017; Pájecí pasty, 2017).

Tab. 1.2 – Srovnání pájecích past od různých výrobců

| Název pasty               | Složení, %          | Tekutý stav, °C | Bod tání, °C | Hmotnost balení, kg | cena s DPH Kč | E-shop     |
|---------------------------|---------------------|-----------------|--------------|---------------------|---------------|------------|
| Alpha OM-338T             | Sn96.5, Ag3, Cu 0.5 | 219             | 217          | 0.5                 | 2 904         | HOTAIR     |
| Sn/Cu 500g                | Sn99.3, Cu0.7       | 227             | 227          | 0.5                 | 3 025         | HOTAIR     |
| Sn/Ag/Cu M705 500g        | Sn96.5, Ag3, Cu 0.5 | 219             | 219          | 0.5                 | 3 025         | HOTAIR     |
| Sn42 Ag1 Bi57 500g        | Sn42 Ag1 Bi57       | 204             | 137          | 0.51                | 2 420         | HOTAIR     |
| Sn42 Bi58 500g            | Sn 42 Bi58          | 141             | 141          | 0.52                | 2 420         | HOTAIR     |
| Bezolovnatá páj. pasta    | Sn42 Bi58 35g       | ....            | 138          | 0.5                 | 3 474         | vp centrum |
| No Clean 96.5Sn/3Ag/0.5Cu | Sn96.5, Ag3, Cu 0.5 | ....            | 217          | 0.25                | 1 243         | vp centrum |
| No Clean 96.5Sn/3Ag/0.5Cu | Sn96.5, Ag3, Cu 0.6 | ....            | 217          | 0.5                 | 2 770         | vp centrum |
| S3X58-M650_7              | Sn3, Ag0.5, Cu96,6  | 219             | 217          | ...                 | ...           | Koki       |
| PF 602-P30 HALOGEN-FREE   | Sn42, Bi58          | 185             | 139          | ...                 | ...           | ULBRIC H   |
| S3X58-M501                | Sn3, Ag0.5, Cu96,5  | 219             | 217          | ...                 | ...           | Koki       |

Obr. 1.9 shrnuje graficky rozdíly teplot tání jednotlivých pájecích past, které jsou v tab. 1.2. Jejich teplotní body, kdy se dostávají pájecí pasty do tekutého stavu, se liší v závislosti na použitých prvcích v dané pastě.



Obr. 1.9 – Srovnání bodů tání

### 1.6.3 Srovnání pájecích pecí

Přetavovací pec (anglicky reflow-oven) dosáhla svého vzniku a rozmachu až s příchodem nové technologie, a to pájecích past umožňujících bezkontaktní pájení. Důvod, proč je zrovna tato technologie nejvíce používaná v dnešní době, je ten, že umožňuje dosahovat většího počtu zhotovených desek za menší čas, je levnější, bezúdržbová (nepájí se ručně), což se odráží např. při opravách zařízení (vymění se celý vadný komponent, což je levnější). Pro domácí provedení, též „hobby“, postačí pro její realizaci několik věcí. Je potřeba pouze konkrétní pájecí pasta, kterou nanese na desku a pro roztavení použijeme běžně dostupný „domácí“ spotřebič, a to troubu, která je schopná dosáhnout požadované teploty. Ovšem z hlediska kvality, jakosti, přívětivosti k životnímu prostředí atd., jsou navrženy speciální průmyslové pece, které velice dobře dosahují stabilní a homogenní teploty v celém svém vnitřním prostoru pájení. Díky speciální konstrukci dochází i k eliminaci úniků teploty z pece.

Existuje mnoho výrobců, kteří nabízejí reflow pece s různě odlišnými technologiemi, ale princip zůstává stále stejný. Na webových stránkách jsou přímo e-shopy firem nabízejících tyto produkty, a pokud nebudeme nuceni vybírat podle značky a ceny, je pro člověka pohybující se mimo tuto oblast výběr docela složitý, protože několik pecí je doplněno nadstandardními doplňky, jako je třeba ovládání pece mimo pracovní prostor. V tab. 1.3 a tab. 1.4 je přehledný souhrn několika pecí od tuzemských a zahraničních firem, což pro názornou ukázkou stačí.

Pece dělíme na dva typy, a to na dávkové a průběžné. V tab. 1.3 je srovnání dávkových pecí použitelných především pro malosériovou a vzorkovou výrobu DPS, které jsou malého rozměru. Pece mají několik vlastností. Disponují od zadávání několika možných pájecích programů zadávaných přes PC klávesnici (čas, teplotu) s nastavitelnými teplotními profily pro jakoukoliv desku, až k připojení externího termočlánku v peci pro sledování přímo teploty na desce a displejem, ať už sedmissegmentovým nebo LCD zobrazujícím aktuální informace o stavu pece. Většina typů pecí bývá připojena k rozvodné třífázové síti pro menší zatížení sítě (u pecí s větším příkonem se zátěž rozloží mezi jednotlivé fáze) Tyto pece jsou navrhovány a konstruovány přednostně pro bezolovnaté pájení (Přetavovací pece, 2017; Přetavovací pece, 2017; Batch reflow ovens, 2016).

Tab. 1.3 – Srovnání pájecích dávkových pecí, část A

| Reflow-pec | Elektrický příkon, W | Teplotní rozsah °C | Systém          | Váha v kg | Nahřívací čas pro stabilitu/nastavitelný čas, s |
|------------|----------------------|--------------------|-----------------|-----------|---|
| HA ONE     | 3650                 | 60-300             | Horkovzdušný    | 18        | 480   |
| HA TWO     | 3650                 | 60-300             | Horkovzdušný    | 34        | 600   |
| HR 22 LF   | 4800                 | 50-270             | Horkovzdušný    | 32        | /1-999  |
| HR 23 LF   | 4800                 | 50-270             | Horkovzdušný    | 37        | /1-999  |
| MR 10      | 1500                 | 30-250             | Horkovzdušný    | 30        | .....   |
| SB 20      | 800                  | 70-300             | IR horkovzdušný | 7,5       | 0-300   |
| SB 30      | 1500                 | 70-350             | IR horkovzdušný | 15,5      | 0-300   |
| SB 40      | 2500                 | 70-350             | IR horkovzdušný | 27        | 0-300   |
| SB 50      | 2300                 | 70-350             | IR horkovzdušný | 17        | 0-300   |
| FT02       | 1000                 | 300                | Horkovzdušný    | 17,5      | 0-180   |
| FT06-SA    | 4800                 | 50-270             | IR horkovzdušný | 32        | 1-999/9999                                      |
| FT05.B     | .....                | 300                | Horkovzdušný    | 39        | 0-300   |

Tab. 1.3 – Srovnání pájecích dávkových pecí, část B

| Reflow-pec | Počet zón/profilů | Teplota předehřevu, °C | Zdroje        | Webový portál  |
|------------|-------------------|------------------------|---------------|----------------|
| HA ONE     | 2                 | 60-260                 | Český katalog | P2J Technology |
| HA TWO     | 2                 | 60-260                 | Český katalog | P2J Technology |
| HR 22 LF   | ....              | 50-270                 | Český katalog | P2J Technology |

Tab. 1.3 – Srovnání pájecích dávkových pecí, část B - pokračování

| Reflow-pec | Počet zón/profilů | Teplota přehřevu, °C | Zdroje           | Webový portál  |
|------------|-------------------|----------------------|------------------|----------------|
| HR 23 LF   | ....              | 50-270               | Český katalog    | P2J Technology |
| MR 10      | 2                 | 100-179              | Český katalog    | ABE.TEC        |
| SB 20      | ....              | 150-220              | Český katalog    | ABE.TEC        |
| SB 30      | ....              | 150-220              | Český katalog    | ABE.TEC        |
| SB 40      | ....              | 150-220              | Český katalog    | ABE.TEC        |
| SB 50      | ...               | 150-220              | Český katalog    | ABE.TEC        |
| FT02       | 2                 | .....                | Anglický katalog | C.I.F          |
| FT06-SA    | 2                 | .....                | Anglický katalog | C.I.F          |
| FT05.B     | 2                 | .....                | Anglický katalog | C.I.F          |

Druhým typem jsou pece průběžné (kontinuální). Do této skupiny spadají i pece, které lze řídit dálkově, tzn., že je zde možnost decentralizovaného ovládání např. pomocí displeje na těle pece přes tzv. teach box. Jejich přednost spočívá v recirkulaci horkého vzduchu. Nejde o výhřev pomocí sálání tepla, které je emitováno do prostoru z topných těles, jak je tomu u pecí dávkových, ale o výhřev prouděním. Teplo vznikající z topných těles, infračervených lamp, je rozháněno ventilátory a cirkuluje po celé své pracovní délce tak, aby byl výkon všude homogenní. Směr proudění je řízen potřebnými cestami po celé své pracovní délce. Další vlastností je možnost připojení externího zařízení (tiskárny) přes komunikační rozhraní USB a zaznamenat teplotní profily na papír. Komunikace mezi obsluhou a zařízením je zaopatřena přes displej, přes který je možné hlídat hladinu kyslíku, zobrazit ji obsluze a pro případ optimalizace této hladiny externě připojit zdroje dusíku (Přetavovací pece, 2017; Přetavovací pece, 2017; HB Automation SMT ..., 2017; Ersas, 2017).

Tab. 1.4 – Srovnání pájecích kontinuálních pecí, část A

| Reflow pec | Elektrický příkon, W | Teplotní rozsah, °C | Počet zón | Rychlost dopravníku m/min | Váha v kg | Nastavitelný čas pro stabilitu v, s |
|------------|----------------------|---------------------|-----------|---------------------------|-----------|-------------------------------------|
| SHA ONE    | 3650                 | 300                 | 3         | 0,15-0,60                 | 60        | 900                                 |
| SHA Two    | 7800                 | 300                 | 4         | 0,1-1,2                   | 160       | 900                                 |

Tab. 1.4 – Srovnání pájecích kontinuálních pecí, část A - pokračování

| Reflow-pec   | Elektrický příkon, W | Teplotní rozsah, °C | Počet zón | Rychlost dopravníku m/min | Váha v, kg | Nastavitelný čas pro stabilitu v, s |
|--------------|----------------------|---------------------|-----------|---------------------------|------------|-------------------------------------|
| TP - 1003    | 8000                 | 300                 | 13        | 0,3-20                    | ...        | 1800                                |
| MR 260       | 3800                 | 280                 | 4         | 0,1-0,8                   | 80         | 900                                 |
| TP - 0803    | 7000                 | 300                 | 11        | 0,3-20                    | ...        | 1800                                |
| TP - 1203    | 9000                 | 300                 | 15        | 0,3-20                    | ...        | 1800                                |
| HOTFLOW 4/26 | 12000-19000          | .....               | 26        | 0,2-2                     | 2800       | .....                               |
| HS - 0802    | 9000                 | 300                 | 10        | 0,3-2                     | ....       | 1800                                |
| HS - 1002    | 10000                | 300                 | 12        | 0,3-2                     | ....       | 1800                                |
| HS - 1202    | 11000                | 300                 | 14        | 0,3-2                     | ....       | 1800                                |

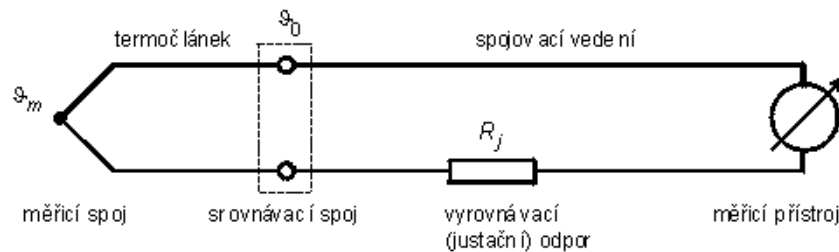
Tab. 1.4 – Srovnání pájecích kontinuálních pecí, část B

| Reflow-pec   | Šířka pájecí plochy, mm | Pracovní délka pece mm | Zdroje           | Webový portál  | Systém          |
|--------------|-------------------------|------------------------|------------------|----------------|-----------------|
| SHA ONE      | 265                     | 860                    | Český katalog    | P2J Technology | IR horkovzdušný |
| SHA Two      | 365                     | 1400                   | Český katalog    | ABE.TEC        | IR horkovzdušný |
| MR 260       | 260                     | 900                    | Český katalog    | ABE.TEC        | Horkovzdušný    |
| TP - 0803    | 1400                    | 3125                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |
| TP - 1003    | 1400                    | 3895                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |
| TP - 1203    | 1400                    | 4710                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |
| HOTFLOW 4/26 | 1410                    | 7115                   | Anglický katalog | Kurtz ersa     | Horkovzdušný    |
| HS - 0802    | ....                    | 3121                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |
| HS - 1002    | ....                    | 3891                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |
| HS - 1202    | ....                    | 4706                   | Anglický katalog | HB Automation  | Horkovzdušný    |

### 1.6.4 Měření teploty

Aby se mohl použít termočlánek, je třeba vědět základní informace, jak funguje, jaké má vlastnosti atd. Termočlánek je možné pro lajky jednoduše charakterizovat jako svařený bod ze dvou odlišných druhů kovů (drátů), kdy má na konci každý materiál odlišné napětí v závislosti na teplotě v tzv. srovnávacím spoji. Tzn. teplota působící v místě společného spoje liší se od teploty na koncových bodech vodičů.

Termoelektrický jev objevil roku 1821 Thomas Johann Seebeck, který zjistil, že má-li dva spoje s různými odlišnými druhy kovů, při jiné teplotě vzniká nenulové napětí (kontaktní napětí je odlišné na každém rozhraní), tedy termoelektrické.



Obr. 1.10 – Termočlánek (Měření teploty, 2017)

Termoelektrické napětí  $\Delta U$  je dáno rozdílem kontaktních napětí, které vzniká na obou spojích z odlišného materiálu

$$\Delta U = T_2 - T_1, \quad (1.2)$$

kde  $T_1$  – je teplota na jednom konci jednoho vodiče,  $^{\circ}\text{C}$ ,

$T_2$  – je teplota na druhém konci druhého vodiče,  $^{\circ}\text{C}$ .

Každý termočlánek je charakterizován svou termoelektrickou silou, jenž je vysvětlován jevy Peltierovým a Thomsonovým. Nejdříve je třeba vědět, co to jsou elektromotorické síly, které jsou jedním z hlavních parametrů slitin potřebných pro výrobu termočláneků.

Elektromotorické napětí, známé také jako EMS (elektromotorická síla), je označováno jako elektrická veličina vytvořená formou energie neelektrického charakteru. Aby došlo ke vzniku odlišných potenciálů (odlišného elektrického napětí), je potřeba počítat s působením teploty, tedy neelektrickou veličinou, která vyvolá pohyb elektronů s důsledkem měnící se hustoty. Větší teplota bude zvyšovat kinetickou energii, a tudíž dojde k rychlejšímu pohybu

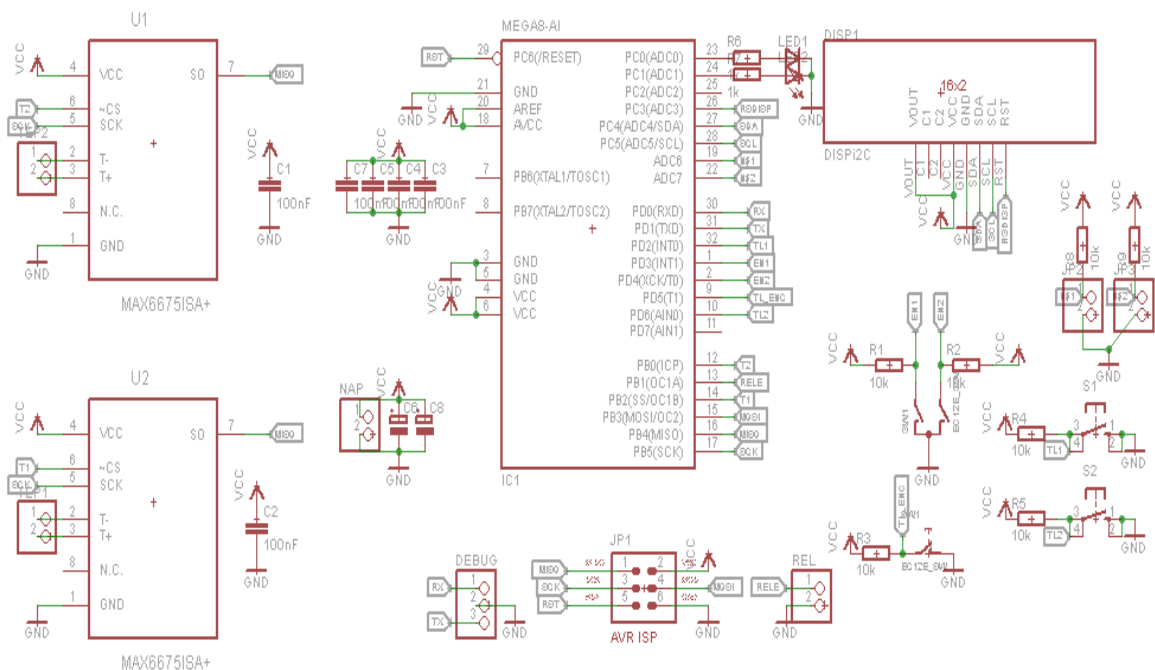


elektronů (ochuzení daného vodiče) a v případě studenějšího vodiče k nárůstu počtu elektronů (naakumulování). Proto na koncích obou vodičů různé teploty dojde k odlišnému elektrickému napětí.

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

Tato práce, z anglického názvu Soldering Hotplate, je jednou z několika bezkontaktních metod pro pájení za pomoci pájecí pasty. Prvek, který slouží pro regulaci teploty, může být složen různě. V této práci je realizován mikropočítačem od firmy Atmel, do kterého se nastaví požadovaný teplotní profil, dále samotnou topnou deskou, která sálá teplo na přiloženou pájenou PCB desku, je doplněn teplotním senzorem (termočlánek) a polovodičovým relé, které vykonává spínání.

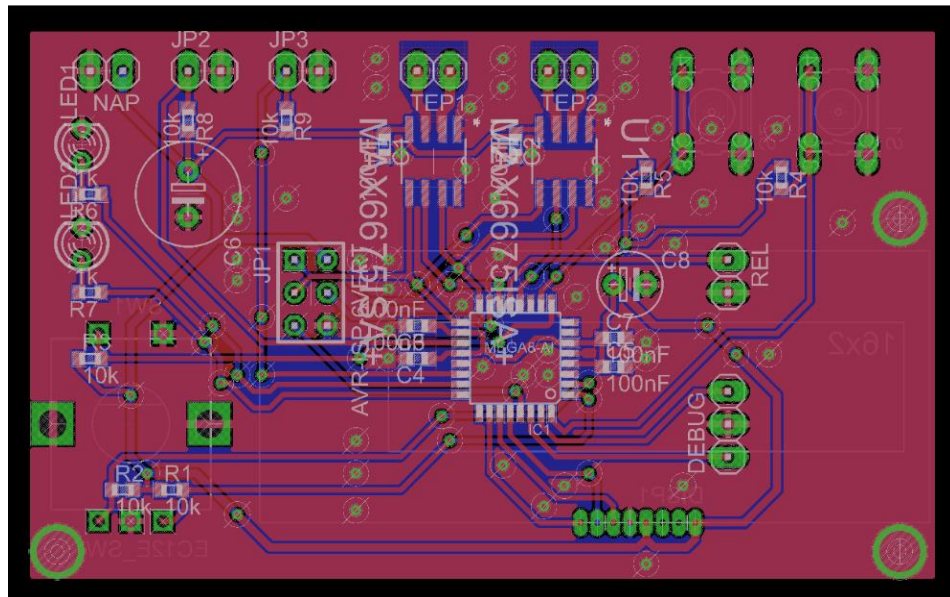
Pro navržení pece tak, aby uměla pájet podle předepsaného postupu, je nezbytné, aby se teplota ovládala. Proto je použit termočlánek k měření teploty. Celkový návrh desky pro regulátor je navržen v CAD softwaru Eagle, který je volně k využití (stažení) pro nekomerční účely. Výhodou softwaru je to, že umožňuje jak výrobu schémat, tak i render jeho fyzického tvaru, jak bude vypadat třeba po vyfrézování a zároveň pro osázení. Předností Eaglu je, že nelze omylem zaměnit cesty ve vykreslování při fázi board. Samotný proces je hlídán podle schématu, který je nakreslen jako první. Funguje jako zpětná vazba při tvorbě desky a následně zapojení. Celé schéma návrhu regulátoru je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 – Schéma regulátoru

Pro takto vyhotovené schéma lze automaticky vygenerovat tzv. board, v překladu z angličtiny deska. V tomto prostředí, které nabízí Eagle, se nastaví základní uživatelské

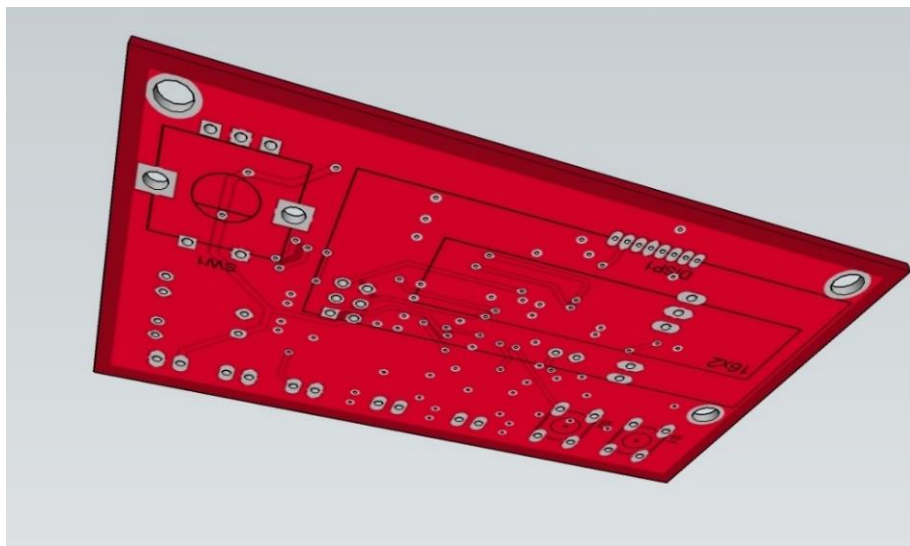
hodnoty, a to, jak má rozměry, uspořádání komponentů, mezery mezi cestami, nebo velikost pájecích bodů. Záleží na autorovi, jakým způsobem bude desku vyhotovovat. V průběhu generování desky je možné změnit zadání ve schématu. Tyto změny se objeví i v boardu, takže nemusíme mít obavy, že se cesty propojí tak, jak nechceme. Z tohoto důvodu je EAGLE uživatelsky velice příjemný software. Na obr. 2.2 je vygenerována deska pro vyhotovení. V tomto případě se jedná o oboustrannou DPS.



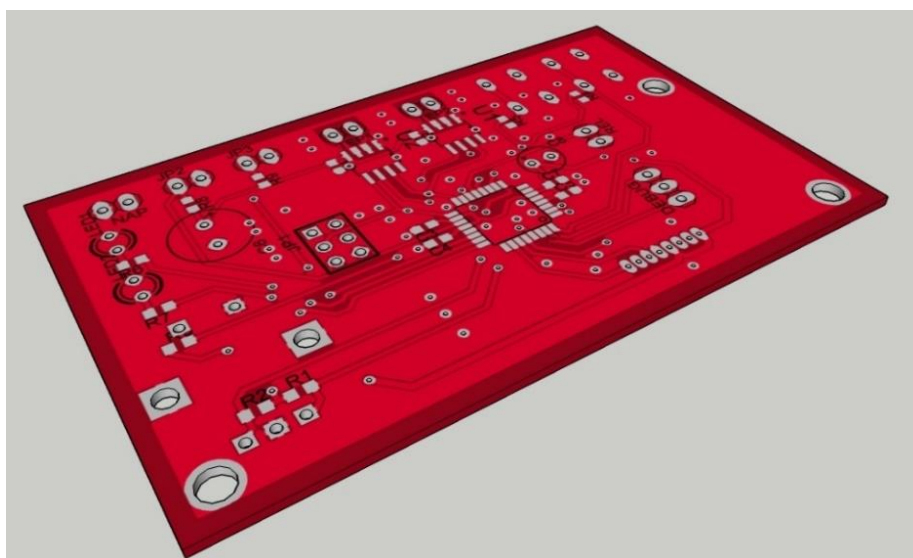
Obr. 2.2 – Board regulátoru

Aby bylo možné regulátor sestavit, je třeba dopředu vědět, jaké součástky se použijí. Na začátku je třeba rozmyslet, jak a co bude zpracovávat vstupní data a následně je posílat dalšímu členu. Jde o zpracování dat o teplotě, která se přijmou, porovnájí a vyšle se signál ano/ne. Při návrhu byl kladen důraz na jednoduchost, a v principu jde o zvládnutí několika funkcí. Oddíl 2.1, Použité komponenty, popisuje funkci jednotlivých komponentů, které byly potřeba pro realizaci.

Program EAGLE disponuje několika vlastnostmi. Jednou z nich, která byla použita, je návrh desky ve 3D s použitím dalšího pomocného softwaru SketchUp, který provede 3D render DPS. Této vlastnosti bylo využito pro vizualizaci návrhu desky ještě před samotným započítáním realizačních prací. Pohled na desku renderovanou v softwaru SketchUp je na obr. 2.3, kde je pohled na dolní stranu a následně na horní stranu na obr. 2.4.



Obr. 2.3 – Dolní pohled desky regulátoru



Obr. 2.4 – Horní pohled desky regulátoru

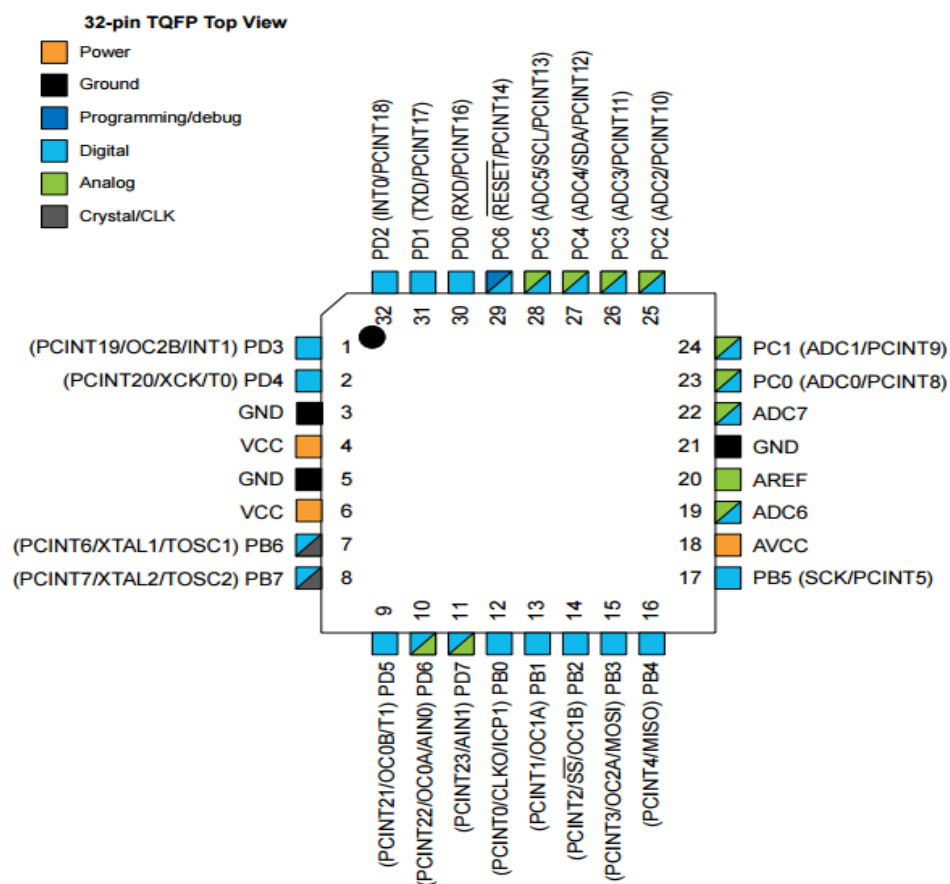
## 2.1 POUŽITÉ KOMPONENTY

Samotnou desku je třeba při procesu pájení měřit (hlídat), získaná data přenést a podle nich regulovat soustavu. Obecně rozlišujeme několik druhů teploměrů podle použití, a to dilatační, tlakové, odporové a termoelektrické neboli termočlánky atd. Každá skupina teploměrů je nějak charakteristická pro konkrétní použití v určitém prostředí. Pokud by se použil senzor např. ze skupiny dilatačních teploměrů na měření teploty pro DPS, docílilo by se neefektivního měření. Je třeba vybrat takový senzor, aby zvládal jak maximální teplotu, tak se i přizpůsobil tvarově při styku s měřicím tělesem. Podmínkou bylo měřit a hlídat teplotu co možná nejpřesněji, a to souvisí i s povrchem měřeného tělesa. V tomto případě se jedná o

hliníkovou desku, poměrně tlustou a rozměrově velikou. Pokud bude těleso např. kulaté, je dobré použít senzor teploty buď s malou stykovou plochou, nebo z ohebného materiálu, aby celá jeho styková plocha přilnula k měřenému tělesu. Ideální je použít termočlánek. Má malé rozměry (nedochází k rychlému chladnutí), přizpůsobí se tvarově, vydrží vysokou teplotu za malou pořizovací cenu.

### 2.1.1 Mikropočítač ATmega88A

Srdcem DPS je mikropočítač ATmega88A. Volba procesoru byla dána kompromisem, mezi schopností zvládat jak daný proces, obsahem několika komunikačních rozhraní pro komunikaci s několika perifériemi a cenou. Dále, vzhledem k použití SMD při osazování DPS, musel být obvod taktéž v SMD variantě pouzdra. Z tohoto důvodu byl zvolen typ pouzdra TQFP obsahující 32 pinů.



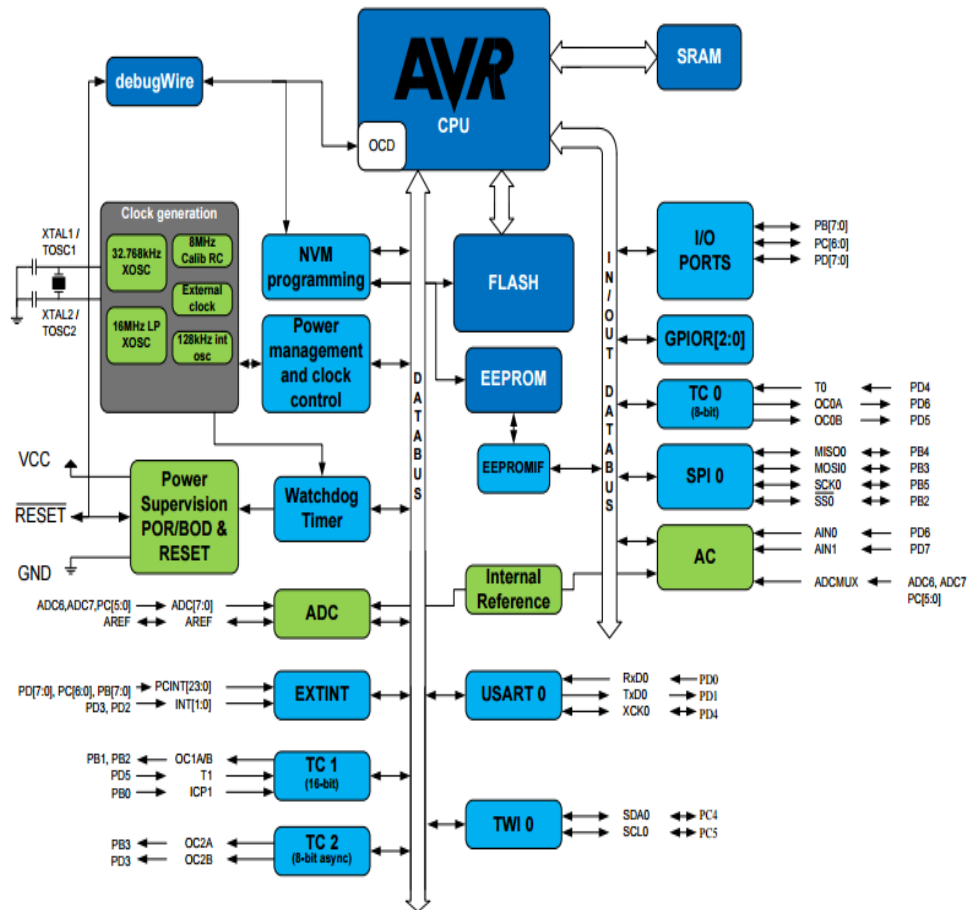
Obr. 2.5 – SMD pouzdro mikropočítače a názvy jednotlivých pinů (Atmel Corporation, 2016a)

Samotný procesor ATmega88A disponuje třemi 8bitovými vstupně výstupními porty označenými PB, PC a PD, piny pro uzemnění a napájení mikropočítače referenčním napětím (maximální hodnota), resetování a s možností připojení externího krystalu, který z důvodu jednoduchosti zapojení nebude použit. Tab. 2.1 shrnuje základní technické parametry, kterými mikropočítač disponuje.

Tab. 2.1 – Funkce ATmega88A (Atmel Corporation, 2016a)

| Název funkce                 | Hodnota                      |
|------------------------------|------------------------------|
| počet prog. instrukcí        | 131                          |
| velikost paměti EEPROM       | 512 kB                       |
| počet čítačů (časovačů)      | 2 8bitové, 1 16bitový        |
| velikost paměti FLASH        | 8 kB                         |
| sběrnice                     | USART, I <sup>2</sup> C, SPI |
| SRAM                         | 1 kB                         |
| typ procesoru                | AVR                          |
| počet pracovních registrů    | 32 8bitových                 |
| teplotní rozsah pro aplikaci | -40°C do 85°C                |

ATmega88A disponuje několika typy čítačů/časovačů s možností použití děličky pro dosažení konkrétních počtu taktů za čas. Tato možnost může být nastavena i s přerušením, tzv. zásobníkem přerušení, do kterého se ukládá adresa strojové instrukce, která měla být provedena, kdyby nedošlo k přerušení (návratová adresa). Této vlastnosti se využívá v případě, kdy uživatel během čtení daného (cyklu) programu zasáhne do chodu programu jiným požadavkem. Pokud není nastaven zásobník přerušení, musí uživatel počkat s požadavkem do doby, než se daný program provede. V případě použitého programu nebylo třeba tuto funkci implementovat, jelikož se jednalo o jednoduché instrukce jako zobrazení aktuální teploty, nastavené teploty a veškeré uživatelské příkazy jsou již implementovány v programu samotném bez možnosti externího zásahu do chodu. Samotný procesor je v zapojení využíván pouze pro zpracovávání a vyhodnocování vstupních informací o teplotě a časech.



Obr. 2.6 – Vnitřní blokové uspořádání mikročítače (Atmel Corporation, 2016a)

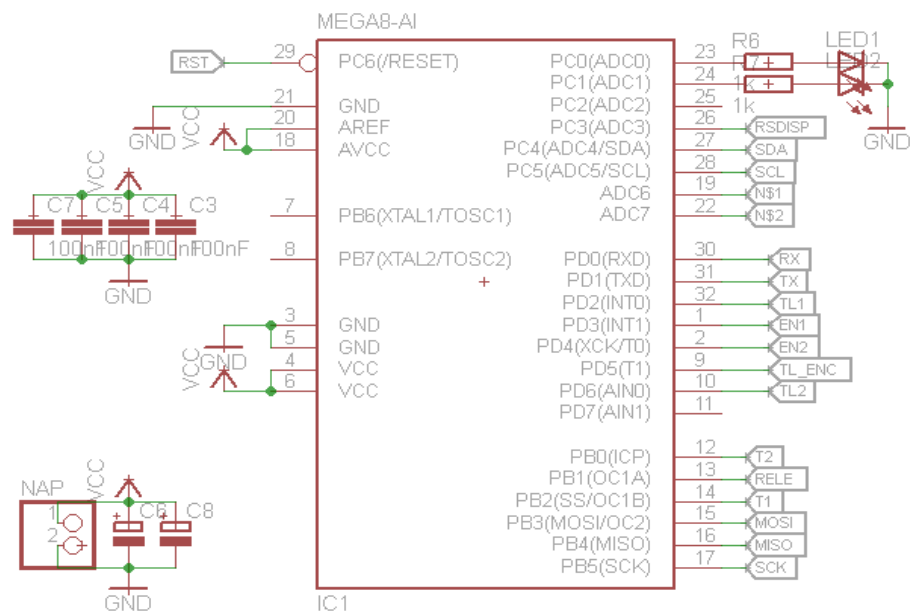
Vstupně výstupní porty jsou ovládány trojicí registrů, které slouží pro komunikaci s periferiemi.

- PINx – získání aktuální hodnoty z daného portu.
- PORTx – odeslání/přijmutí hodnoty do/z portu, který je nastaven jako výstup.
- DDRx – 8 bitů tvořících řídicí byte DDRx určují, zda jsou piny daného portu v hodnotě logické 0 - vstupy nebo v hodnotě logické 1 - výstupy.

```
DDRC |= (1 << PC0) | (1 << PC1) | (1 << PC3);
DDRB |= (1 << 0) | (1 << 1) | (1 << 2) | (1 << 3) | (1 << 5);
PORTB |= (1 << 0) | (1 << 2);
```

Obr. 2.7 – Nastavení portu

Na napájecích vstupech má mikropočítač paralelně připojené tzv. blokovací kondenzátory z důvodu vyrovnání (stabilizaci) případného kolísání napájecího napětí. Jelikož mikropočítač potřebuje pevně danou vstupní úroveň napětí a při větší, náhlé spotřebě elektrického proudu může dojít ke kolísání úrovně napětí. Z tohoto důvodu se zdroje musí přizpůsobovat tak, aby měly co nejmenší změnu napětí při náhlém zakolísání.



Obr. 2.8 – Schéma zapojení obvodu ATmega8A

### 2.1.2 ISP konektor

Mikropočítač obsahuje několik typů sběrnic, které umožňují naprogramovat samotný mikropočítač nebo mu umožnit komunikaci s okolím. Deska je vybavena konektorem ISP sériové sběrnice, přes kterou můžeme přeflashovat programovatelnou FLASH paměť v mikropočítači přes sériové periferní rozhraní SPI běžným programovatelným paměťovým programem nebo programem On-chip Boot spuštěným v jádře AVR. V našem případě byl použit k naprogramování programátor AVR ISP mk2 komunikující přes rozhraní ISP od firmy Atmel a využívající vývojovou platformu (software) Atmel Studio 7 pro ladění (programování) aplikací. Samotný programátor lze rozdělit z hlediska hardwaru do několika bloků. Začíná datovou komunikací přes USB rozhraní z PC do AVR ISP programátoru, instrukce jsou v bloku USB řadičem řízeny, poté zpracovány v MCU a jsou jim přiřazeny úrovně převodníkem. Následně jsou výstupním kabelem z programátoru do mikropočítače na koncové desce posílána data. V našem případě byl použit šestižilový kabel. Rozmístění



daných pinů konektoru je dáno použitým rozhraním, po kterém komunikuje a které podporuje ATmega88A. V tomto případě se jedná o ISP konektor (Atmel Corporation, 2016b).



Obr. 2.9 – Programátor AVR ISP (Atmel Corporation, 2016b)

Programátor je na povrchu pouzdra vybaven RGB diodou, která při programování vizuálně signalizuje obsluze, v jakém stavu se právě nachází.

Tab. 2.2 – Led programátor AVR ISP (Atmel Corporation, 2016b)

| LED barva                  | Funkce   |
|----------------------------|--|
| Červená                    | Nepřipojen programovatelný cíl   |
| Zelená                     | Připojen programovatelný cíl   |
| Oranžová                   | Programování na sběrnici   |
| Oranžová blikající         | Zpětné připojení cílového kabelu, nebo nesprávný pull-up na reset pinu |
| Červená blikající          | Zkrat na cílovém obvodu  |
| Červeno oranžová blikající | Upgrade režim  |

Pro programování přes SPI rozhraní je potřeba rozdělit zařízení na typ MASTER (pán), který řídí komunikaci se synchronizací v hodinovém signálu, který sám generuje, a na jeden (jednoduchá komunikace) nebo více zařízení typu SLAVE (otrok), který poslouchá na sběrnici v hodinovém signálu. Výhodou ISP je, že lze programovat mikroprocesor bez nutnosti jeho vyjmutí z obvodu a lze ho použít i pro upgrade firmwaru. Piny pro použití SPI rozhraní jsou obsaženy na portu B, které jsou určeny pro tuto funkci dle datasheetu. Tab. 2.3 prezentuje funkci jednotlivých pinů použitých pro ISP.

Tab. 2.3 – Tabulka pinů ISP konektoru (Atmel Corporation, 2016b)

| Popis pinu | Funkce  |
|------------|---|
| VCC        | Napájecí napětí                                 |
| GND        | Zem   |
| MOSI       | Master Out Slave In, sériová linka od PC do AVR |
| MISO       | Master In Slave Out, sériová linka od AVR do PC |
| SCK        | Hodinový signál                                 |
| RST        | Reset   |

Součástí inicializační kontroly je, zda je cílový kabel správně připojen, protože v případě absence zámku na konektoru může dojít k jeho obrácení. Tato kontrola se provádí tak, že se po připojení k cílovému obvodu zkontroluje, zda má resetovací vedení správné napětí, a ověří, jestli je možné tento pin snížit na hodnotu low (0 V), tzn., že při resetu bude stavová kontrolka blikat oranžově. Pokud je pull-up odpor na vedení při resetování nastaven na high (1 V), spustí se ochrana proti zkratu a reset je stažen na hodnotu 0 programem AVRISP (Atmel Corporation, 2016b).

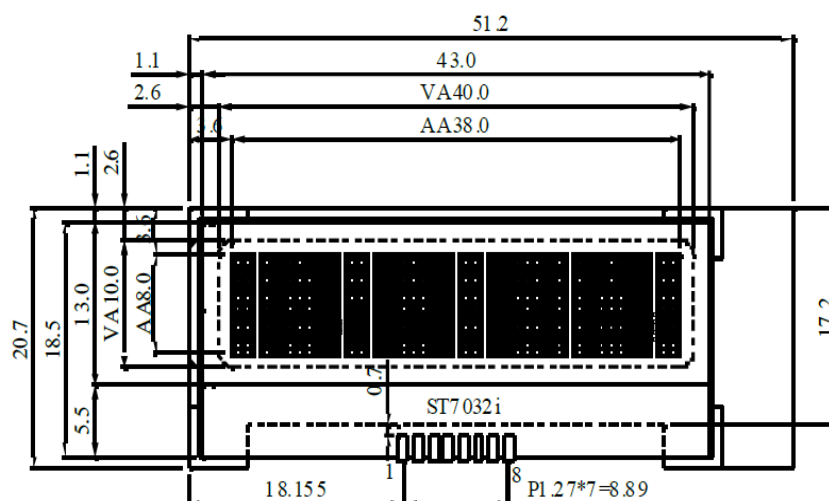


Obr. 2.10 – ISP programovací konektor

Na obr. 2.10 je zobrazen ISP konektor z návrhu schématu v Eagle, který může sloužit také pro komunikaci mezi procesorem a periferií. Jak už bylo řečeno, pouze jedna strana, a to MASTER, může generovat hodinový signál buď SCK nebo CLK. Data jsou odesílána z MASTER do SLAVE po pinu MOSI, ale pokud SLAVE potřebuje odeslat odpověď zpět na MASTER, který pokračuje v generování předem stanoveného počtu hodinových cyklů, tak SLAVE pošle data na pin. MISO. SPI je plně duplexní, což znamená, že má samostatné vodiče pro odeslání a příjem dat a umožní tedy data současně přijímat a odesílat.

### 2.1.3 LCD displej

Regulátor je vybaven komunikačním rozhraním s LCD displejem, který zprostředkovává komunikaci mezi člověkem a mikropočítačem a zobrazuje žádanou a aktuální teplotu. Pro indikaci běhu programu je DPS vybavena dvěma LED diodami. Tyto jsou barevně odlišené, přičemž jedna z nich značí správnou inicializaci displeje při úplném začátku (naběhl jsem správně), a v případě, že je do mikropočítače nahrán správně program, tak druhá LED dioda bliká v cyklu provedení programu na konci smyčky, a signalizuje správný chod programu. Použitý displej je typu MIDAS MCCOG21605B6W-SPTLYI (MCCOG21605B6W-SPTLYI, 2015).



Obr. 2.11 – LCD displej (MCCOG21605B6W-SPTLYI, 2015)

Jedná se o alfanumerický LCD displej s maticí 2x16 znaků. Má 8 pinů řazených číselně od 1 do 8 zleva z čelního pohledu a každý pin má konkrétní funkci, jejich význam je uveden v tab. 2.4.

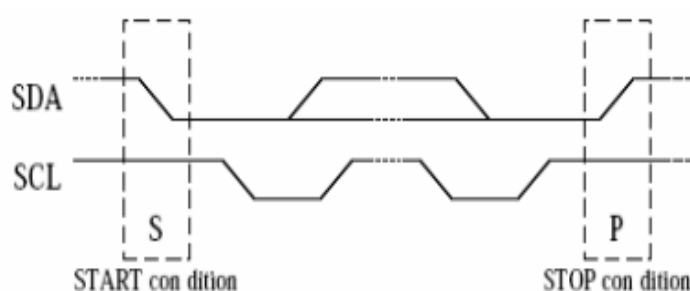
Tab. 2.4 – Tabulka pinů LCD displeje (MCCOG21605B6W-SPTLYI, 2015)

| Číslo pinu | Označení | Velikost napětí, V | Popis                                  |
|------------|----------|--------------------|--|
| 1          | VOUT     |                    | Nastavení kontrastu                    |
| 2          | CAP1N    |                    | Pro napěťové posílení obvodů (VDD-VSS) |
| 3          | CAP1P    |                    |  |
| 4          | VDD      | 3/5 V              | Zdrojové napětí                        |

Tab. 2.4 – Tabulka pinů LCD displeje - pokračování (MCCOG21605K6W-SPTLYI, 2015)

| Číslo pinu | Označení | Velikost napětí, V | Popis                                 |
|------------|----------|--------------------|---------------------------------------|
| 5          | VSS      |                    | GND                                   |
| 6          | SDA      |                    | Vstupní data pro sběrnici I2C         |
| 7          | SCL      |                    | Vstupní hodinový puls po sběrnici I2C |
| 8          | RST      |                    | Reset                                 |

S mikropočítačem komunikuje po sběrnici I2C, která se skládá ze dvou vodičů, kde jeden vodič funguje jako datová linka SDA a druhá linka jako zdroj hodinového signálu SCL. V tomto případě v rámci přístupové architektury master-slave bude fungovat mikropočítač jako MASTER a display jako SLAVE. Zařízení s označením MASTER je nadřazené, a tudíž řídí sběrnici. MASTER zahájí komunikaci tím, že vyšle adresu daného cíle SLAVE. Na sběrnici může být několik zařízení SLAVE, ale tato zařízení během komunikace poslouchají na sběrnici, a pokud některé zařízení SLAVE zjistí, že MASTER vyslal jeho adresu, potvrdí ji signálem acknow, přidrží SDA ve stavu L. Tento stav trvá až do doby devátého hodinového pulzu. Jelikož adresa zařízení je sedmibitová, je osmý bit používán jako příznak Read/Write při komunikaci. Pokud je bit nastaven na hodnotu 1, bude se ze zařízení SLAVE číst. V opačném případě bude proveden zápis (MCCOG21605B6W-SPTLYI, 2015).



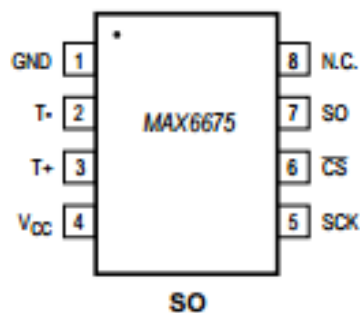
Obr. 2.12 – Zahájení komunikace I2C (MCCOG21605B6W-SPTLYI, 2015)

Při úplném začátku komunikace je vyslána informace start sekvence zařízením MASTER. Datový vodič SDA je možné měnit jen v případě, kdy je hodinový signál SCL ve stavu low. Pokud dojde k opaku, když je vodič SCL ve tvaru high, je tento stav brán na vodiči SDA jako platný. Výjimku tvoří pouze sekvence start a stop, kde MASTER vyšle stop

sekvenci. Sběrnice je v klidovém stavu na úrovni high pomocí pull-up rezistorů, které jsou připojeny na napětí napájecí.

#### 2.1.4 Převodník MAX6675ISA+

Pro volbu, jak převést surová data z měřícího členu, tedy data analogová z termočlánku na hodnoty digitální, zpracovatelné pro mikropočítač, byl použit IO MAX6675ISA+. Jeho pouzdro je konstruováno jako SO (Small Outline) pro osazování technologií SMT.



Obr. 2.13 – Pouzdro převodníku pro termočlánek (MAX6675, 2014)

Při měření teploty je potřeba spolu s termočlánekem použít i kompenzační krabici pro odstranění teplotních změn v okolí. Jelikož by byl tento postup nákladný a pracný, byl zvolen integrovaný obvod MAX6675ISA+. IO má v sobě již zahrnutou kompenzaci studeného spoje, takže není potřeba kompenzační krabice. IO slouží pro zpracování signálu, pro převod mezi termočlánekem a mikropočítačem, kde na svém výstupu posílá data o teplotě přímo v digitální podobě. Slouží jako převodník A/D signálu. Vstupní napětí sleduje výstupní, takže si jsou rovny a slouží pro převod impedance, protože má vstupní odpor co nejvyšší (z důvodu co nejmenšího zatížení samotného termočlánku) a malý výstupní odpor s výstupními ADC převodníky. IO obsahuje ještě jeden důležitý prvek, a to je kompenzační dioda pro kompenzování studeného spoje termočlánku (teplota okolí převodníku).

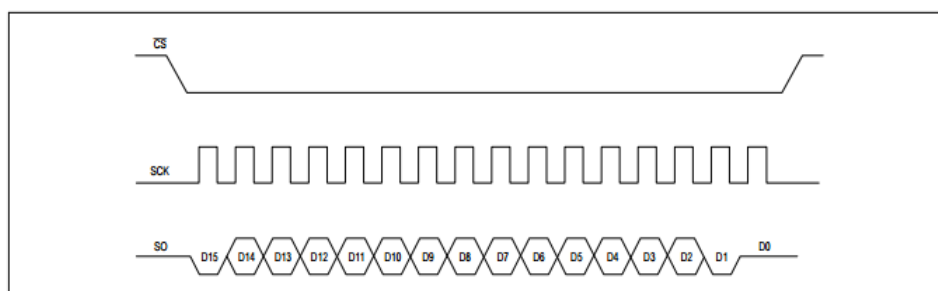
Vnitřní obvody IO si předávají napětí snímací diody (snímá okolní teploty) a napětí termočlánku (snímání vzdálené teploty bez teploty okolní) na funkci převodu uloženou v ADC převodníku pro výpočet teploty spoje termočlánku. Optimální výkon MAX6675ISA+ je dosažen, když je studený spoj termočlánku a IO ve stejné teplotě. Z tohoto důvodu je nezbytné mít regulátor osazený převodníkem MAX6675ISA+ mimo desku, jelikož se zanesou

chyby měření způsobené teplotní závislostí obvodu. Každý pin má přiřazenou funkci, která je reprezentována v tab. 2.5 (MAX6675, 2014).

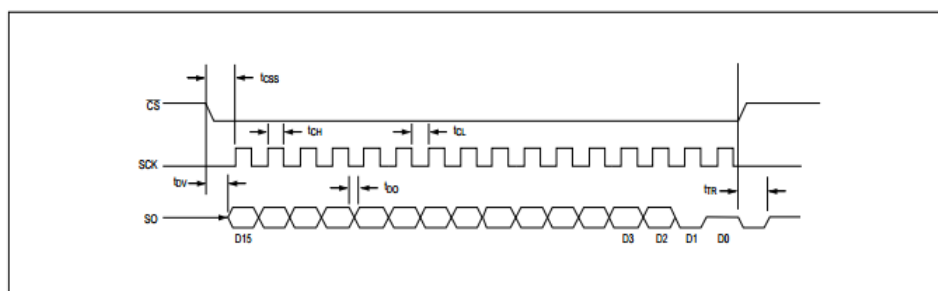
Tab. 2.5 – Tabulka pinů převodníku MAX6675ISA+ (MAX6675, 2014)

| Pin | Značení | Funkce   |
|-----|---------|--|
| 1   | GND     | Zem  |
| 2   | T+      | Pin pro vodič termočlásku  |
| 3   | T-      | Pin pro druhý vodič termočlásku                                  |
| 4   | VCC     | Napájecí napětí  |
| 5   | SCK     | Sériový hodinový puls  |
| 6   | CS      | Výběr čipu, nastavení CS na hodnotu 0, povolíme sériové rozhraní |
| 7   | SO      | Výstup sérová data   |
| 8   | N.C.    | Nezapojeno   |

Obvod MAX6675ISA+ čte data z termočlásku prostřednictvím sériového rozhraní. Tento výsledek je poslán přes pin SO o velikosti 12bitů, kde všechny nuly znamenají 0 °C a všechny jedničky maximální čtení termočlásku. Princip přenášení dat na obr. 2.14 (MAX6675, 2014).



Serial Interface Protocol



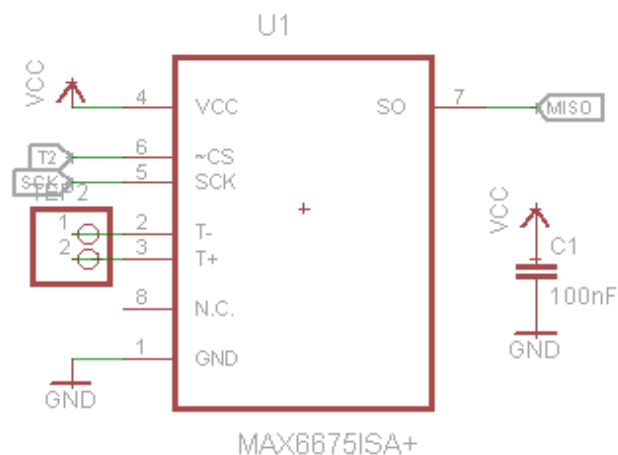
Serial Interface Timing

| BIT | DUMMY<br>SIGN BIT | 12-BIT<br>TEMPERATURE READING |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   | THERMOCOUPLE<br>INPUT | DEVICE<br>ID | STATE |             |
|-----|-------------------|-------------------------------|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|-----------------------|--------------|-------|-------------|
|     |                   | 14                            | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |                       |              |       | 3           |
| Bit | 15                | 14                            | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3                     | 2            | 1     | 0           |
|     | 0                 | MSB                           |    |    |    |    |   |   |   |   |   |   | LSB                   |              | 0     | Three-state |

SO Output

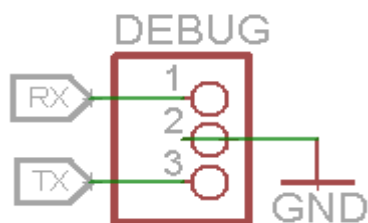
Obr. 2.14 – Komunikace po sběrnici SPI (MAX6675, 2014)

Přizemníme-li pin CS, nastavíme povolení sériové komunikace a SCK čte data z pinu SO v pravidelných hodinových pulsech. Jakákoliv zpětná konverze je tímto zakázána a pro zahájení nové je třeba CS natavit na úroveň high. Kompletní čtení po sériové lince vyžaduje 16 hodinových cyklů (16 výstupních bitů). První bit D15 je fiktivní příznak a je vždycky hodnoty nula. Bity D14-D3 obsahují přenesenou informaci o teplotě v pořadí od MSB až po LSB. Bit D2 je obvykle nízký. Pokud je nastaven na high, je vstup při termočláncu otevřený. D1 je přizemněn, aby poskytl ID zařízení pro IO (MAX6675, 2014).



Obr. 2.15 – Převodník pro termočlánek

Časová osa, kdy je regulační smyčka programu mikropočítače opakována v cyklu, je cca 0,5 s a k ní je vztažena i informace o teplotě. Proto, aby se mohla během regulace exportovat data z mikropočítače, která byla následně použita pro vykreslení grafů v editoru Excel, z nichž byly následně určeny konstanty pro PID regulátor, je třeba data nějakým způsobem přenášet a zaznamenávat do PC. Z tohoto důvodu byla použita komunikace přes rozhraní USART, který ATmega obsahuje a po kterém byla data přijímána a následně ukládána v txt formátu, kde byl sloupec s informací o čase a k němu i odpovídající hodnota teploty. USART je označení synchronní a asynchronní sériové rozhraní sloužící pro přenos dat, tedy pro komunikace mezi mikropočítačem a zařízeními disponující tímto standardem, kde na straně PC se komunikuje přes USB rozhraní. K mikropočítači jsou připojeny dva datové vodiče RXD a TXD, kde TXD značí data vysílaná z mikropočítače, takže je pin nastaven jako výstup a RXD je přijímání dat mikropočítačem.

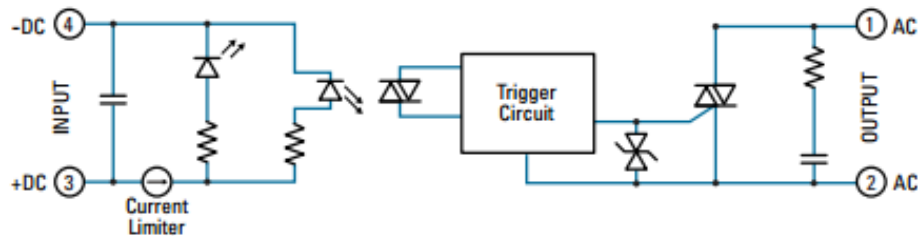


Obr. 2.16 – Konektor pro USART



### 2.1.5 Polovodičové relé

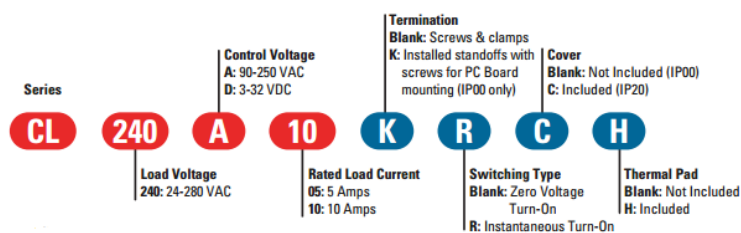
Pro případné připojení indukční pece je použito již spínání v nule, jelikož se musí řešit vznik přechodových jevů při sepnutí. Z tohoto důvodu se musí řešit spínání v nulové fázi vůči síti, jelikož v jiném sfázování vznikají díky indukčnímu charakteru poměrně vysoké proudové rázy a tím k nadměrnému zatěžování distribuční sítě. V případě připínání více desek by již docházelo k vysokému přetěžování distribuční sítě a proudové rázy by již nemusely vydržet použité jističe. Pro řešení tohoto problému bylo použito polovodičové relé typu CRYDOM CL240D10C, které vyřešilo celý problém rušení. Výhodou je jeho spínání v proudové hodnotě 0 (fáze = 0). Konstrukce polovodičového relé je tvořena z vazebního opto-členu, a triaku, který spíná síťové napětí (Crydom, 2015).



Obr. 2.17 – Schéma polovodičového relé (Crydom, 2015)

Výhoda u triaku je ta, že se dá spínat i záporným řídicím signálem, tudíž ho lze na rozdíl od tyristoru použít i na střídavé napětí. Relé disponuje LED indikací, která indikuje sepnutý stav.

Samotné nastavení regulátoru pro teplotní regulaci metody reflow se řídí podle teplotního profilu předepsaného při používání konkrétní pájecí pasty. V této práci je jako akční člen pro spínání zátěže k síťovému napětí využíváno polovodičové relé, a díky tomuto prvku už dochází k jednoduché regulaci soustavy. Této vlastnosti bylo využito při prvotní jednoduché regulaci, kterou budeme provádět spínáním a odepnutím zátěže. Z tohoto důvodu nemusíme řešit další složitou řídicí elektroniku, což je pro toto pojetí samotné práce nejjednodušší řešení.



Obr. 2.18 – Popis zkratk pro polovodičové relé (Crydom, 2015)

## 2.1.6 PID regulátor

Aby bylo možné ovládat regulační pochod a tím do něj zasahovat, obsahuje mikro počítač naprogramovaný PID regulátor. Do regulátoru vstupují vstupní data (regulační odchylka) a na výstupu výstupní data (akční zásah) do regulované soustavy. Každým cyklem provedení programu se regulační odchylka mění, buď je větší, nebo menší, a dochází k většímu, nebo menšímu zásahu do regulovatelné soustavy. PID obsahuje tři složky, o kterých napovídá už sám název. Jeho přenos je závislost výstupu/vstupu a je matematicky popsán ve tvaru tří složek s přenosem v Laplaceově transformaci

$$F(s) = r_0 + r_d s + \frac{r_i}{s} = K_R \left( 1 + T_D s + \frac{1}{T_I s} \right), \quad (2.1)$$

kde  $K_R$  – zesílení,  
 $T_D$  – derivační časová konstanta, s,  
 $T_I$  – integrační časová konstanta, s,  
 $r_d$  – derivační zesílení,  
 $r_i$  – integrační zesílení,  
 $r_0$  – proporcionální zesílení,  
 $s$  – Laplaceův operátor.

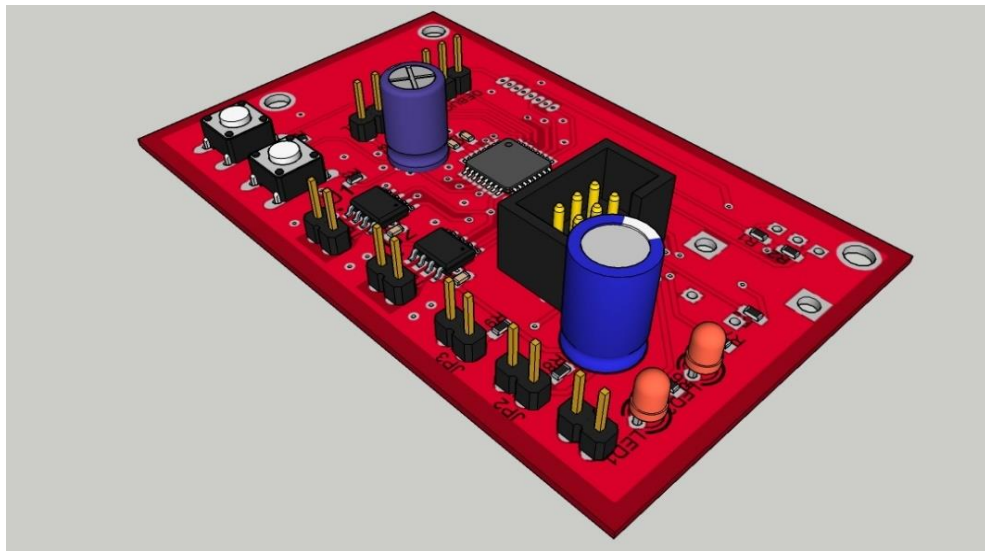
## 2.1.7 Finální model

Po prostudování datasheetu jednotlivých součástek se vytvořila a následně osázela DPS. Při ožívování se připojila k napájecímu napětí a nahrál se firmware s teplotními profily, které se nastavují přímo v programu. Pro představu, jak bude DPS vypadat ještě před samotnou výrobou a osazováním, lze použít software SketchUp.

Na obr. 2.19 je exportovaná deska ze softwaru Eagle a importovaná do softwaru SketchUp, který zhotoví render osazené DPS. SketchUp bohužel neumí přímo vykreslit

všechny komponenty ve 3D pohledu, jelikož záleží na jeho knihovně, zda daný prvek obsahuje. Pokud daná součástka v knihovně chybí, lze si ji uživatelsky vymodelovat nebo případně stáhnout z volně šiřitelných knihoven na internetu.

Technologií pro vytvoření DPS je několik. Jako nejjednodušší metodu můžeme použít frézování, dále se pro domácí účely používá leptání v roztoku peroxidu vodíku s kyselinou chlorovodíkovou nebo chloridem železitým. Také lze použít oboustranný papír, cesty z boardu vytisknout na laserové tiskárně, nažehlit na měděnou desku a vylepat. Jako pokročilou metodu pro domácí použití lze použít světlocitlivý fotokompozit, na něj pomocí UV světla přesvítit pozitiv boardu, tento vyvolat ve slabém roztoku hydroxidu sodného a dále leptat s použitím metod zmíněných výše.



Obr. 2.19 – 3D pohled na desku s komponenty

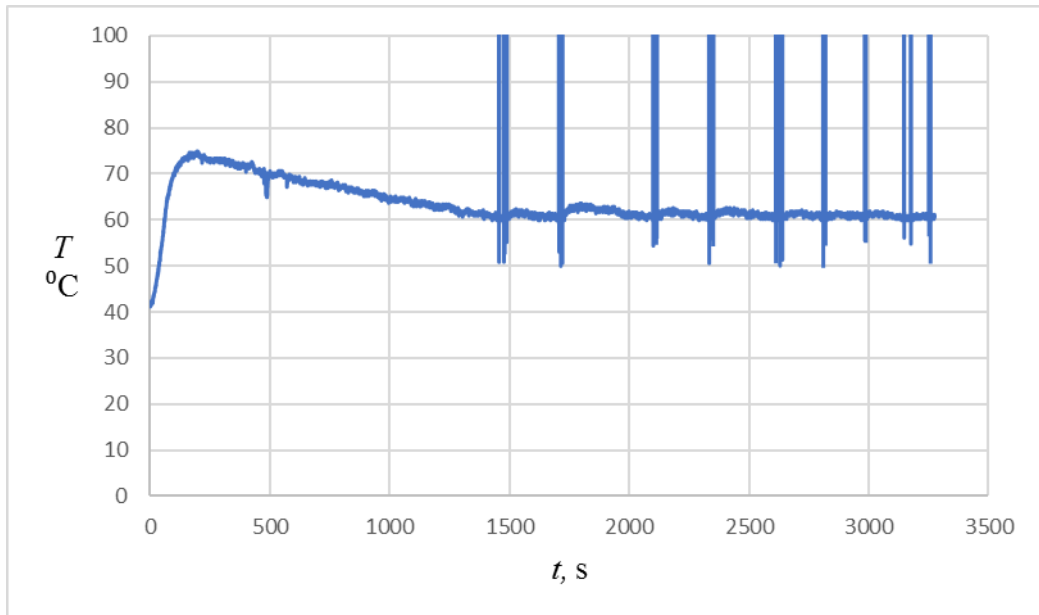
## 2.2 REGULAČNÍ POCHODY

Experimentální vyhledání kritického zesílení by bylo časově náročné, a proto byla využita metoda, při které se zapojí do zpětné vazby místo P regulátoru relé, které se neustále spíná a rozepíná. Hodnoty z tohoto regulačního pochodu slouží pro prvotní odhad konstant pro dosažení do PID regulátoru. Relé ve zpětné vazbě se programuje jednoduchým kódem. RELE\_ON/OFF jsou makra pro ovládání pinu připojeného k mikroprocesoru, sepnuto/rozepnuto.

```
if(zadana>teplota)
{
    //zapni rele
    RELE_ON;
}
else
{
    //vypni rele
    RELE_OFF;
}
```

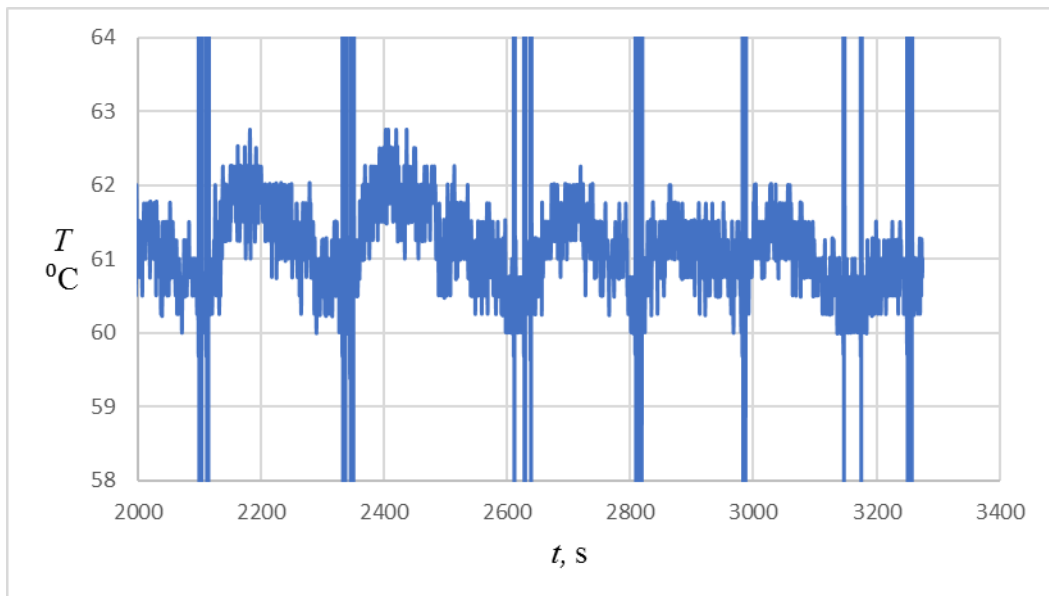
Obr. 2.20 – Kód jednoduché regulace

Na prvním grafu je vidět regulační pochod (přenosovou charakteristiku) regulace z cca 40 °C do 60 °C, při regulaci pomocí relé ve zpětné vazbě. Na začátku regulačního pochodu je vidět, že významný překmit je o cca 15 °C a dobou ustálení téměř 1500 s.



Obr. 2.21 – Relé ve zpětné vazbě

Obr. 2.22 zobrazuje zotožný regulační pochod, který je na obr. 2.21, pouze se jedná o zazoomované oblasti překmitů pro určení kritické periody. U regulačních pochodů reálné soustavy bohužel nejsou křivky ideální, a proto hodnoty konstant nelze určit přesně. Po přiblížení ustálené oblasti je vidět kmitání relé v rozsahu cca 2 °C s kritickou periodou 165 s.



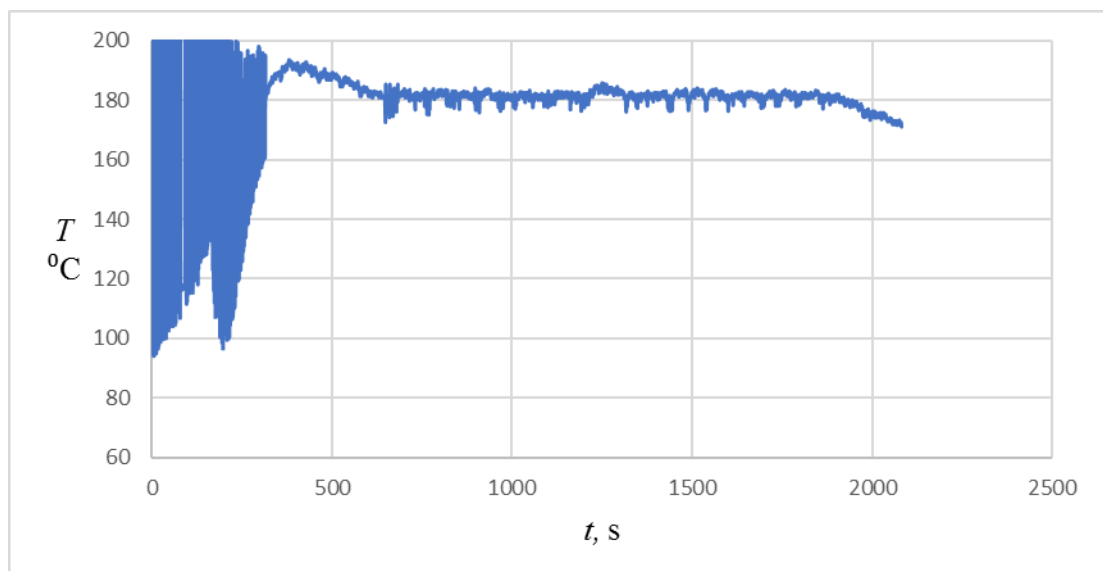
Obr. 2.22 – Relé ve zpětné vazbě – přiblížení

Z regulačního pochodu obr. 2.21 pro žádanou hodnotu 60 °C byly vypočteny konstanty pro P regulátor. Kritická doba kmitu je po odečtení z regulačního pochodu  $T_k$  165 s a kritické zesílení  $r_k$  je podle relé ve zpětné vazbě dáno vztahem

$$r_k = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot a} = \frac{4 \cdot 100}{\pi \cdot 3} = 42,46, \quad (2.2)$$

kde  $M$  – přepíná relé na výstupu konstantní hodnoty,  
 $a$  – je amplituda,  
 $\pi$  – je Ludolfovo číslo.

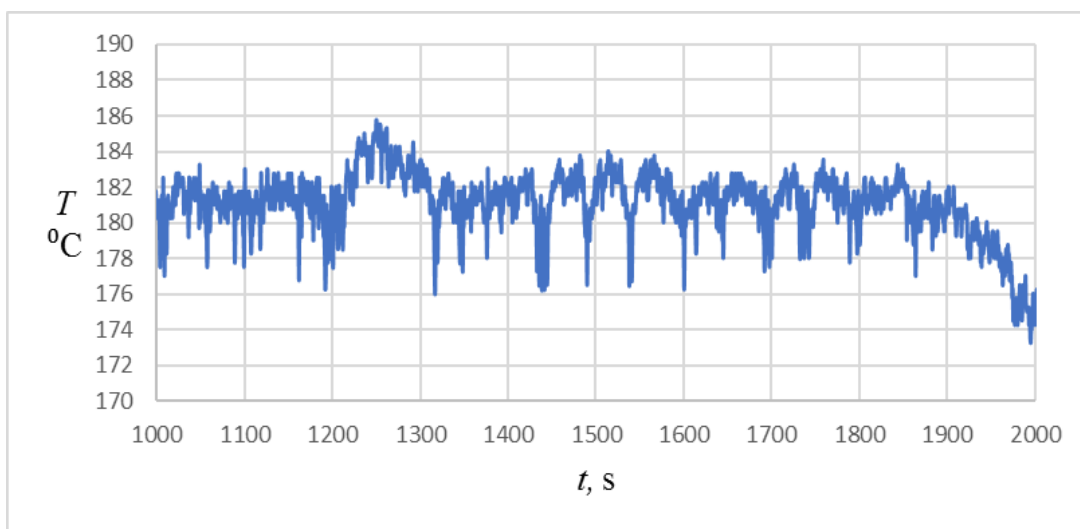
Z toho jsem následně vypočítal parametr, jen pro holý P regulátor podle metody Ziegler-Nichols. I přesto, že byl regulátor nastaven pomocí této metody, byl počáteční překmit dosti veliký i během regulace, kde překmity dosahovaly cca 2 °C. Jak můžeme vidět na obr. 2.22, tato metoda tedy počítá jak s počátečním překmitem, tak i s překmity během regulace. Z důvodu použití teplotně citlivých součástí není tato metoda příliš vhodná. Z tohoto důvodu byla zvolená experimentální metoda náhodné volby konstant P regulátoru i za cenu delší regulační doby. Při volbě této konstanty jsem se pohyboval v okolí hodnot kritického zesílení, a proto bylo nutno tlumit překmit na rozdíl od použití relé ve zpětné vazbě. Z experimentálního určování konstant vyšla nejlépe hodnota zesílení 8, která dávala výsledek zesílení s nejmenšími překmity, viz obr. 2.28.



Obr. 2.23 – Nastavení žádané hodnoty

Na grafu obr. 2.23 je vidět změna žádané hodnoty na 180 °C, překmit je opět cca 15 °C, doba ustálení je ale kolem cca 600 s. Obr.2.23 je zatížen rušením termočlánu a hodnoty regulačního pochodu nejsou plně vypovídající. Ke konci experimentu došlo k přerušení napájení, a tedy k poklesu teploty, důvodem přerušení byl nejspíš vadný jistič v dané laboratoři.

Přibližná ustálená oblast na obr. 2.24 je při žádané 180 °C, hodnoty jsou blízko regulačnímu pochodu jako při 60 °C, rušení snižuje poměrný výkon jdoucí do topení (relé odepíná častěji).



Obr. 2.24 – Nastavení žádané hodnoty – přiblížení

Možností, jak odstranit rušení, je použít filtry, které by byly schopny vyhladit toto rušení. Ovšem do systému by se zanesly další přenosové funkce a charakteristiky, což by se na daný účel zapojení zkomplikovalo a bylo by to o to složitější.

Pro další experimenty byla ukostřena topná deska a propojena s GND řídicí desky do jednoho bodu, aby se odstranil vliv rušení způsobeného napětím objevujícím se na topné desce, které dosahovalo proti GND jednotek voltů a které při přímém kontaktu termočlánu způsobovalo píky na měřeném průběhu teploty.

Byl také upraven kód z relé na P regulaci.

```
odchylka=((double)zadana-(double)teplota)/100.0;  
NastavVykon(((int)(8*odchylka)));
```

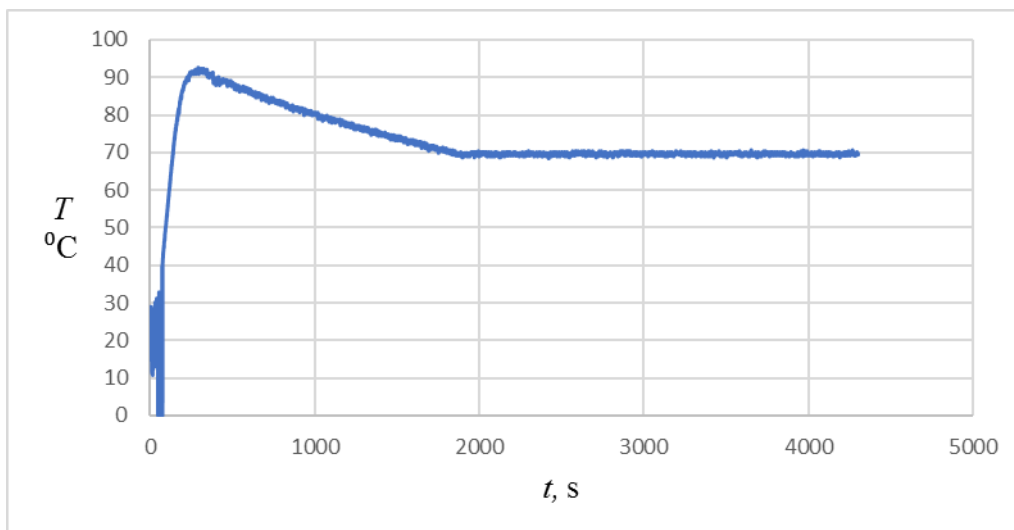
Obr. 2.25 – Kód nastavení P složky

Metoda NastavVykon spíná poměrově síťové napájení, a to tak, že jeden interval je 500ms, vzhledem k tomu, že nechceme spínáním 1,2 kW způsobit nadměrné rušení napájecí soustavy, používáme spínací relé s detekcí průchodu nulou, které jindy nespíná, jak bylo zmíněno v teoretickém rozboru použitého relé. Regulátor tedy spíná v násobcích doby trvání půlvln síťového napětí. 500 ms má 50 půlvln, rozlišení regulátoru je tedy 2 % maximálního výkonu.

```
void NastavVykon(int vykon)
{
    vykon=vykon/2;
    int i=0;
    LED0_OFF;
    for (i=0;i<50;i++)
    {
        if (vykon>i)
        {
            RELE_ON;
            LED1_ON;
        }
        else
        {
            RELE_OFF;
            LED1_OFF;
        }
        if(zadana<teplota)
        {
            RELE_OFF;
            LED1_OFF;
        }
        _delay_ms(10);
    }
}
```

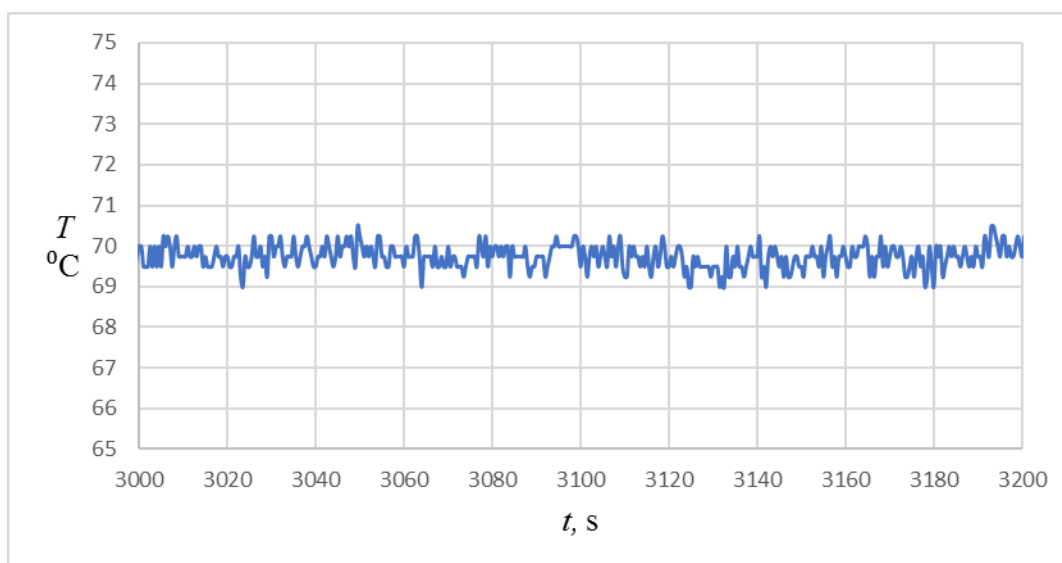
Obr. 2.26 – Nastavení půlvln





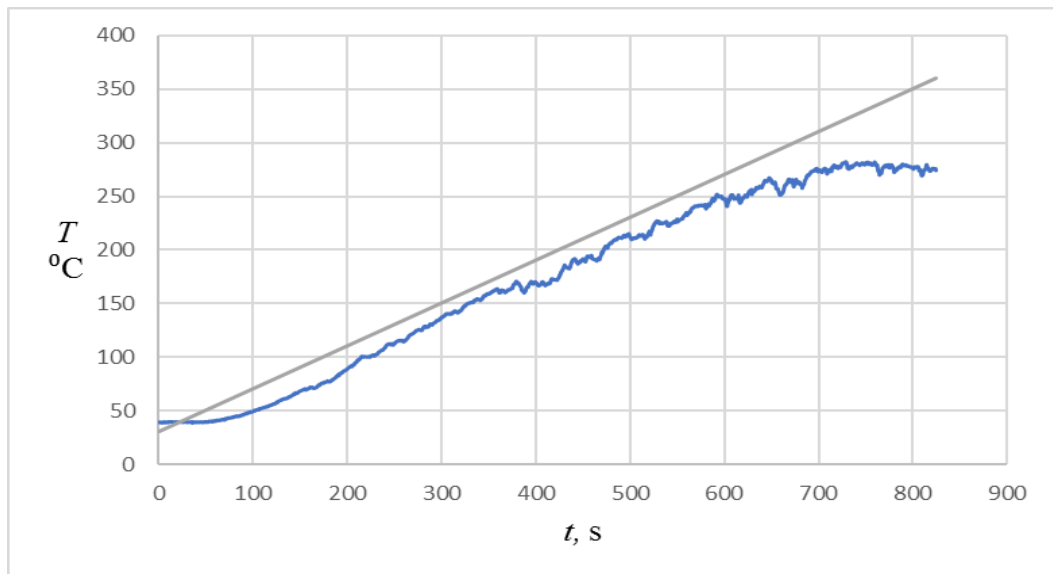
Obr. 2.27 – Regulační pochod z  $20^{\circ}\text{C}$  na  $70^{\circ}\text{C}$  s P složkou a překmitem o cca  $15^{\circ}\text{C}$

V přibližné oblasti na obr. 2.28 ustáleného stavu je průměrná regulační odchylka jen kolem  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Z daného pohledu bylo uznáno, že přidání I a D složky by pouze komplikovalo návrh, jelikož rychlost ustálení a dosažení požadované hodnoty je na hranici výkonu topení a tepelné kapacity (regulátor tedy nemá možnost dosáhnout požadované teploty rychleji).



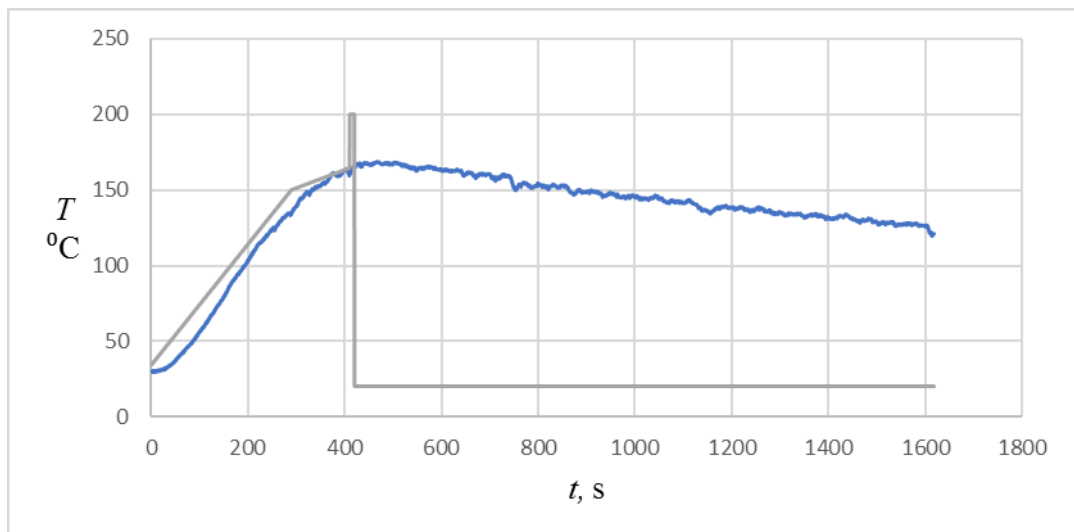
Obr. 2.28 – Regulační pochod s P složkou – přiblížení

Obr. 2.29 ukazuje sledování gradientu nastaveným P regulátorem.



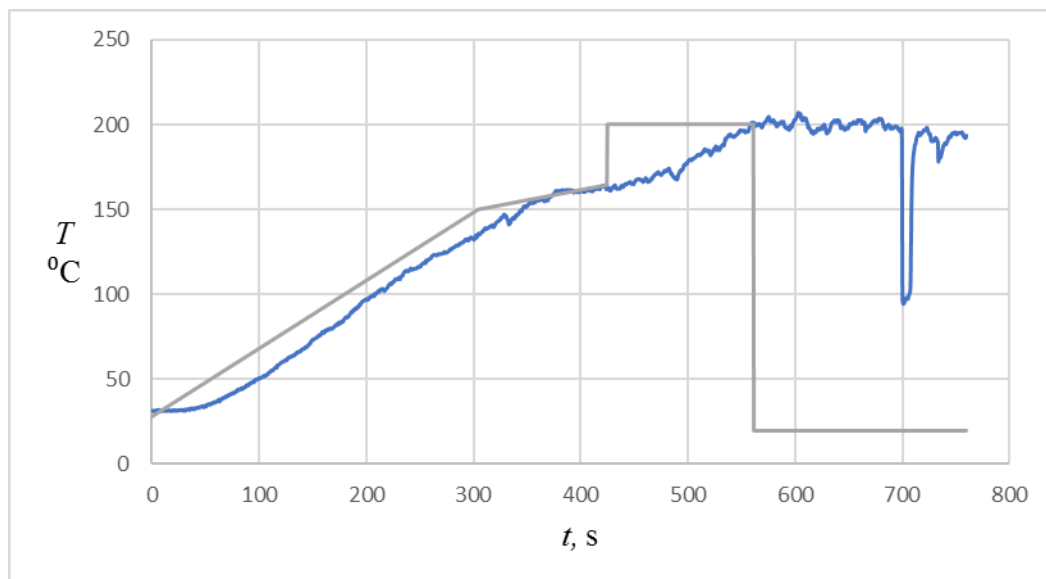
Obr. 2.29 – Rampování, sledování žádané hodnoty

Obr. 2.30 zobrazuje experimentální odhad pájecího profilu. Zde je žádaná hodnota nastavena jako teplotní profil (šedá) a měřená teplota by měla její průběh v ideálním případě kopírovat (modrá).



Obr.2.30 – Nástřel pájecího profilu

Obr. 2.31 zobrazuje pájecí profil, který je již nastaven už podle reálného profilu určité pájecí pasty. V místě, kde dochází k přetavení pájecí pasty, v grafu skok s náběžnou hranou v čase cca 410 s, stoupá teplota pomalu a dochází k nepřesnostem.



Obr. 2.31 – Reálný pájecí profil

Z výsledků nastavení regulace a ověřování činnosti je vidět, že omezením není regulace ani elektronika, ale fyzikální konstanty a omezení systému, které nebyly součástí návrhu bakalářské práce (hliníková deska), hliníkový blok s topnými elementy jsem dostal jako součást zadání.

## ZÁVĚR

Při výrobě se regulátor dimenzoval na dva termočlánky, obsahující i dva převodníky. Úkolem bylo vytvořit jednotku tak, aby dokázala řídit tepelnou soustavu podle předepsaného teplotního profilu. I přesto, že se jednalo o dosti veliký topný blok, je úloha funkční při kontrole jedním termočlánkem. Oba převodníky jsou stejně navrhnuty pro DPS a pro zprovoznění současně i s druhým převodníkem stačí navrhnout firmware, ve kterém se provede změna tak, aby regulátor byl ovlivněn i druhým termočlánkem, který by byl přidělán na DPS.

Z hlediska nárůstů rampy se dají dodržet doporučení, jelikož rychlosti nárůstů se většinou udávají jako maximální rychlost teploty za sekundu. Problém nastává v místě, kdy má dojít ke krátkodobému překročení pájecí teploty a následně k chladnutí s definovanou rychlostí. Tepelná kapacita desky je vysoká a volným chladnutím chladne přibližně pouze o 3 °C za minutu.

Pájecí deska se výborně hodí pro aplikace, kdy pájení desek s masivní rozlitou zemí je potřeba dovést k předeřevu, v tomto případě se používá regulace na konstantní teplotu těsně pod pájecí teplotou a k pájení součástek se používá klasická hrotová pájka, nebo horký vzduch. Lze ji použít i pro zapájení se spuštěním pájecího profilu, ale zde je nutné desku po dokončení sundat a nechat chladnout volně mimo. Pokud by měla být deska použita komplexně, musel by se hliníkový blok odlehčit odvrtáním nebo odfrézováním přebytečného materiálu a přidáním aktivního chlazení.

## POUŽITÁ LITERATURA

- ATMEL CORPORATION. 2016a. *ATmega48A/88A/168A*. [online]. Arizona. 481 s. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42733-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-88A-168A\\_Datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42733-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-88A-168A_Datasheet.pdf)
- ATMEL CORPORATION. 2016b. *Atmel AVRISP MkII*. [online]. San Jose. 17 s. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-42093-AVR-ISP-mkII\\_UserGuide.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-42093-AVR-ISP-mkII_UserGuide.pdf)
- Batch reflow ovens. 2016. *C.I.F.* [online]. L'Agence Web. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://cif.fr/en/68-batch-reflow-ovens>
- Cínové pasty. 2017. *Hotair*. [online]. Ostrava. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://www.hotair.cz/pasty-ciny-lepidla/cinove-pasty/stranka-1-24.html>
- Crydom. 2015. Panel Mount SSR CL Series. *Mouser Electronics*. [online]. Crydom Inc. 8 s. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: [http://www.mouser.com/ds/2/657/c\\_1-1063172.pdf](http://www.mouser.com/ds/2/657/c_1-1063172.pdf)
- Ersa. 2017. HOTFLOW reflow oven, reflow soldering, void free. *Kurtz Ersa*. [online]. Electronics Production Equipment. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.kurtzrsa.com/electronics-production-equipment/soldering-machines/reflow-soldering.html>
- ESELAI. 2013. Srovnání olovnaté a bezolovnaté pájky [online]. In: Lowyat.net. [online]. Kuala Lumpur. [cit. 2017-07-02]. Dostupné z: <https://forum.lowyat.net/topic/2812895/all>
- HB AUTOMATION SMT Reflow soldering oven Wave soldering. 2017. *HB Automation*. [online]. Čína. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.smt-hb.com/product.htm?gclid=CN6LgoW9iNICFaIW0wodi20B4Q>
- Jak na nepájivou masku a servisní potisk. 2009. *Pandatron.cz*. [online]. Vysoké Mýto. Pandatron. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: [http://pandatron.cz/?987&jak\\_na\\_nepajivou\\_masku\\_a\\_servisni\\_potisk](http://pandatron.cz/?987&jak_na_nepajivou_masku_a_servisni_potisk)
- MAX6675. 2014. MAX6675. *Maxim Integrated Products, Inc.* [online]. 8 s. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>
- MCCOG21605B6W-SPTLYI. 2015. Midas. *Mouser Electronics*. [online]. Great Yoarmouth. 38 s. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: [http://www.farnell.com/datasheets/2021773.pdf?\\_ga=2.232095647.1052667846.1495029235-364582649.1488922368](http://www.farnell.com/datasheets/2021773.pdf?_ga=2.232095647.1052667846.1495029235-364582649.1488922368)
- Měření teploty. 2017. Termočlánky. [online]. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.maryshfmmi.webzdarma.cz/mttd.htm>
- Pájecí pasty. 2017. *VP Centrum elektronika*. [online]. Litoměřice: VP Centrum elektronika [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.vpcentrum.eu/pajeci-technika/pajeci-pasty>
- Pájení. 2017. Pájení. *Elektro Kolos*. [online]. Kolín. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.elektrokolos.wz.cz/ostatni/pajeni.php>
- PF 602-P30 HALOGEN-FREE SOLDER PASTE. 2017. *Ulbrich*. [online]. Česká Republika, Brno [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.ulbrich.cz/pf-602-p30-halogen-free-solder-paste7>

- Přetavovací pece. 2017. *ABE.TEC*. [online]. Ostřešany. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://www.abetec.cz/eshop/category/pretavovaci-pece/>
- Přetavovací pece. 2017. *P2J Technology*. [online]. Dašice. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://www.pajeci-technika.cz/www-pajeci-technika-cz/eshop/5-1-Pajeci-pece-a-lazne>
- Reflow soldering profiles. 2015. *CompuPhase*. [online]. Thiadmer Riemersma. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://www.compuphase.com/electronics/reflowsolderprofiles.htm#SPACERS>
- Reflow soldering. 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Reflow\\_soldering](https://en.wikipedia.org/wiki/Reflow_soldering)
- Solder paste. 2017. *Koki*. [online]. KOKI Company. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: [http://www.ko-ki.co.jp/en/products/solder\\_paste/index.html](http://www.ko-ki.co.jp/en/products/solder_paste/index.html)
- Surface-mount technology. 2001. In: *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. San Francisco. [cit. 2016-12-08]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount\\_technology](https://en.wikipedia.org/wiki/Surface-mount_technology)
- STOKLASA, F. 2010. Pájecí slitiny. *Coptel-Elektrotechnika*. [online]. Kroměříž. [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/?action=2&doc=6096>
- SZENDIUCH, I. 2004. Pájení a bezolovnaté pájky. [online]. 10 s. [cit. 2017-04-20]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- ŠINDELÁŘ, V.; KRUPKA F. 1955. *Měření teploty: úvod do měření teplot pro technickou praxi a pro studium s příklady a tabulkami*. 2. vyd. Praha: Práce. 247 s.
- What is the relationship between Celsius, Fahrenheit and Kelvin? 2016. *Quora*. [online]. Quora website [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <https://www.quora.com/What-is-the-relationship-between-Celsius-Fahrenheit-and-Kelvin>

# **PŘÍLOHY**

**A - CD**

**Příloha k bakalářské práci**

Pájecí deska

Lukáš Maděra

**CD**



## **Obsah**

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Zdrojový kód regulátoru pájecí desky
- 3 Schéma zapojení desky plošných spojů v programu Eagle
- 4 Fotodokumentace pájecí desky