

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Regulace pece pro pájení SMD
Lukáš Nosil

Bakalářská práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš Nosil**
Osobní číslo: **I08244**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Regulace pece pro pájení SMD**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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 pec upravenou na 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 by měl obsahovat uživatelské rozhraní umožňující alespoň základní nastavení, mělo by umožňovat spustit pájecí cyklus, případně možnost přepnout na držení 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

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Teplom%C4%9Br>

[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:

21. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci 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.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 25. 6. 2013

Lukáš Nosil

Poděkování

Rád bych touto cestou chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, ing. Pavlovi Rozsivalovi, za poskytnuté cenné rady a pomoc při osazení DPS. Dále bych také chtěl poděkovat spolužákům, kteří mi byli nápomocni v době studia a především rodině za všestrannou podporu během mé doby studia.

Anotace

Tématem této bakalářské práce je vytvoření regulační jednotky pece pro pájení součástek typu SMD. Dále jsou zde popsány fyzikální principy, uplatňující se při pájení, spolu s charakteristikami různých typů pájecích pecí, rozborem regulace tepelných soustav a popisem vybraných senzorů teploty v řádu 0 °C – 400 °C.

Klíčová slova

Regulační jednotka; SMD; teplota; pájecí pec; tepelná soustava; senzory teploty

Title

Regulation of the furnace for soldering SMD.

Annotation

The theme of this bachelor thesis is to create a regulatory unit of furnace for soldering SMD components. Next the physical principles applied during soldering are described, along with the characteristics of certain types of soldering furnaces, analysis of regulation of thermal systems and description of chosen temperature sensors in a range of 0 °C – 400 °C.

Keywords

Regulatory unit; SMD; soldering furnace; temperature; temperature sensors; thermal system

Obsah

Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	10
I. Teoretická část	12
1 Pájení.....	13
1.1 Pájky.....	13
1.1.1 Olovnaté pájky pro měkké pájení.....	14
1.1.2 Bezolovnaté pájky pro měkké pájení.....	15
1.1.3 Smáčivost a vzlínavost	16
1.1.4 Tavidla.....	17
1.2 Ruční pájení.....	19
1.2.1 Tvrdé a měkké pájení	20
1.2.2 Postup měkkého pájení.....	21
1.3 Strojní pájení	22
2 Pájení přetavením.....	23
2.1 Druhy přenosu tepla	23
2.1.1 Vedení (kondukce)	23
2.1.2 Proudění (konvekce).....	24
2.1.3 Záření (radiace).....	25
2.2 Metody pájení přetavením	25
2.3 Konvekční pájení.....	26
2.4 Pájení pomocí infračerveného záření	27
2.5 Kondenzační pájení (pájení v parách)	28
2.6 Pájení pomocí laseru.....	29
2.7 Teplotní profil.....	30
2.7.1 Použití pájecích past s olovem.....	30
2.7.2 Použití bezolovnatých pájecích past.....	32
3 Regulace tepelných soustav	33
3.1 Základní pojmy regulace	33
3.2 Dvoupolohový regulátor.....	34

3.3	PID - regulátory	35
3.3.1	Proporcionální složka	36
3.3.2	Integrační složka.....	36
3.3.3	Derivační složka	37
3.3.4	Vztahy pro PID regulátor a jejich aplikace	37
3.3.5	Nastavení PID regulátorů podle zkušenosti.....	38
3.3.6	PID – regulátory v praxi	39
4	Měření teploty v řádu 0 °C – 400 °C.....	39
4.1	Základní pojmy.....	39
4.1.1	Senzory teploty a jejich rozdělení	40
4.1.2	Statická charakteristika.....	41
4.1.3	Nejistota měření a senzorů	42
4.1.4	Dynamické vlastnosti a přechodová charakteristika	43
4.2	Polovodičové senzory teploty s PN přechodem	44
4.2.1	Diodové senzory teploty	44
4.2.2	Tranzistorové PN senzory teploty	46
4.3	Kovové odporové senzory teploty	46
4.3.1	Platinové odporové snímače teploty.....	48
4.3.2	Niklové odporové snímače teploty	51
4.4	Termoelektrické články	52
5	Řízení výkonu pájecí pece.....	54
6	Praktická část.....	55
6.1	Senzor a jeho převodník	56
6.1.1	A/D převodník a komunikace s mikroprocesorem	57
6.2	Mikroprocesor ATmega88	59
6.2.1	Propojení mikroprocesoru s PC.....	60
6.3	Displej.....	61
6.4	Regulace výkonu	61
6.5	Program pro řízení pájecí pece	62
6.6	Návrh DPS	64
6.7	Kalibrace senzoru	64
6.8	Nastavení pájecího profilu a držení teploty	65

Závěr	68
Literatura	69
Příloha A – Schéma zapojení mikroprocesorové části	71
Příloha B – DPS mikroprocesorové části	72
Příloha C – CD	72

Seznam zkratek

BGA	Ball grid array
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DPS	Deska plošných spojů
IR	Infrared radiation
ISP	In-system programming
LSb	Least significant bit
MIL	United States Military Standard
PC	Personal computer
PDIP	Plastic dual in-line package
PN	Přechod mezi polovodiči typu P a N
RoHS	The restriction of use of certain Hazardous Substances
RSS	Ramp-Soak-Spike
RTS	Ramp-To-Spike
SI	Le Système International d'Unités (International System of Units)
SPI	Serial Peripheral Interface Bus
SMD	Surface-mount device
THT	Through-hole technology
TQFP	Thin quad flat package
USART	Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Fázový diagram slitiny cínu a olova.....	14
Obrázek 2 - Smáčivost povrchu pájkou.....	16
Obrázek 3 – Varianty plynové páječky pro tvrdé pájení [6] [7].....	20
Obrázek 4 - Transformátorová páječka, elektrická páječka a pájecí stanice.....	20
Obrázek 5 - Průběh ručního pájení	22
Obrázek 6 - Vsázková pájecí pec [8].....	26
Obrázek 7 - Průběžná infračervená pec [9]	27
Obrázek 8 - Princip kondenzační pece	28
Obrázek 9 - Pájecí profily olověných past s různým složením	30
Obrázek 10 - Pájecí profil bezolovnaté pasty [11]	32
Obrázek 11 - Blokové schéma regulačního obvodu.....	33
Obrázek 12 - Princip dvupolohové regulace s hysterezí	34
Obrázek 13 - Blokové schéma dvupolohové regulace	35
Obrázek 14 - Číslicová regulační soustava.....	37
Obrázek 15 - Převodní charakteristika A/D převodníku [15].....	42
Obrázek 16 - Přechodová charakteristika 1. a 2. řádu [15]	43
Obrázek 17 - Teplotní závislost charakteristiky PN přechodu Si diody [15].....	45
Obrázek 18 - Tranzistorová dioda	46
Obrázek 19 - Závislost odporových snímačů na teplotě [15].....	48
Obrázek 20 - Závislost odporu platinového čidla Pt 100 na teplotě.....	49
Obrázek 21 - Wheatstoneovy můstky [15]	50
Obrázek 22 - Tolerance niklových snímačů	51
Obrázek 23 - Termoelektrické napětí	52
Obrázek 24 - Měřicí řetězec termočlánu [15].....	53
Obrázek 25 - Pulzně šířková modulace	54
Obrázek 26 - Regulace napětí tyristorem	54
Obrázek 27 - Blokové schéma převodníku s platinovým rezistorem.....	56
Obrázek 28 - Módy převodu A/D převodníku MCP 3551 [18]	58
Obrázek 29 – ATmega88 a varianty pouzder TQFP a PDIP [19].....	59
Obrázek 30 - Zapojení ISP konektoru (6. vodičové).....	60
Obrázek 31 - Relé KSD210AC8 [20].....	61
Obrázek 32 – Vývojový diagram	63
Obrázek 33 – Doporučený pájecí profil pasty KOKI [21]	66

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Bezolovnaté pájky (různí výrobci).....	15
Tabulka 2 - Rozdělení tavidel [1].....	18
Tabulka 3 - Porovnání metod pájení přetavením [1].....	25
Tabulka 4 - Použité materiály pro kovové snímače teploty [15].....	47
Tabulka 5 – Hodnoty teploty senzorů při kalibraci	64
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pájecího profilu	66
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty režimu držení teploty	67

Úvod

Cílem této bakalářské práce je vytvoření měřicí a řídicí jednotky pro pec, upravenou na pájení SMD součástek tak, aby dodržovala předepsané pájecí profily. Vzhledem k obsáhlosti tématu je text rozdělen na 5 kapitol teoretické části, praktickou část a závěr.

V první kapitole teoretické části je popsán proces pájení spolu se souvisejícími vlivy, které ovlivňují výslednou kvalitu pájeného spoje. Většina kapitoly je věnována pájkám, protože tvoří v pájení podstatnou roli. Vzhledem k velkému množství druhů pájek na trhu a různorodosti složení jejich kovů je bylo nutné rozdělit podle různých kritérií. Dále jsou zde popsány principy smáčivosti a vzlínivosti, které se při pájení uplatňují, a jejich ovlivnění pomocí tavidel. V posledních podkapitolách jsou uvedeny rozdíly mezi druhy ručního pájení s použitím odlišného vybavení, pájek a s ukázkou vzniku pájeného spoje.

Druhá kapitola je důkladněji zaměřena na pájení přetavením, kterého se bude využívat ve zkonstruované peci. Rozebrány jsou fyzikální hlediska přenosu tepla (vedení, proudění, záření) a rozděleny jednotlivé metody pájení přetavením. Poslední pasáže jsou věnovány pájecím profilům, jejichž nastavení významně ovlivňuje výslednou kvalitu spojů.

Třetí kapitola je určena regulací tepelných soustav. Po základních pojmech regulačního obvodu následuje seznámení s dvupolohovou regulací, která navazuje na PID - regulátor a jeho funkci v regulačních soustavách. Zde je nastíněno pouze empirické nastavení, k dalším metodám je odkázáno na doporučenou literaturu.

Čtvrtá kapitola se zabývá měřením teploty v řádu 0 °C – 400 °C a senzory teploty. U nich je provedeno rozdělení podle použití a definování některých důležitějších statických a dynamických vlastností, se zmíněním o chybovosti. Popsány jsou senzory: s PN přechodem (diodové a tranzistorové), kovové odporové (platinové a niklové) a termočlánky. Z vyvozených závěrů vyplývá, že pro použití při pájení přetavením jsou vhodné platinové odporové snímače teploty a termočlánky.

Pátá kapitola se stručně věnuje možnostem řízení výkonu pájecí pece s ohledem na minimalizaci vznikajícího rušení. Zde je zdůrazněna nevhodnost použití pulzně - šířkové modulace a vybrána vhodná metoda spínání pomocí tyristoru.

Šestá kapitola se zabývá praktickou realizací regulátoru teploty pájecí pece pomocí mikroprocesoru. Jako teplotní senzor je pro své výhodné vlastnosti vybrán platinový odporový snímač a je proveden návrh A/D převodníku. V dalších podkapitolách následuje stručný popis konkrétního mikroprocesoru, displeje pro zobrazení teploty a informací o průběhu pájení a popis polovodičového relé, které slouží k regulaci výkonu pece. Poslední podkapitoly jsou zaměřeny na softwarovou realizaci programu pro řízení pájecí pece a nastavení pájecího profilu.

Závěr bakalářské práce je zaměřen na zhodnocení výsledků a návrhy zlepšení. Schéma zapojení a návrh DPS jsou součástí příloh.

I. Teoretická část

1 Pájení

Pájení patří mezi nejstarší technologie pro spojování materiálů za tepla. Řadí se mezi metalurgické procesy, při kterých se spojují kovové součásti roztaveným materiálem – pájkou. Ta má nižší teplotu tání než součásti a vlivem adhezních a kohezních sil (adheze = přilnavost, koheze = soudružnost) dojde na styčné ploše materiálů k navázání atomů pájky s atomy spojovaných součástí. Právě na těchto mezivrstvách mezi pájenými materiály a pájkou závisí pevnost spoje – čím je vrstva tenčí, tím je spoj pevnější a naopak. Nutnými podmínkami dokonalého spojení mezivrstev je tzv. smáčivost (schopnost pájky udržovat kontakt s pevným povrchem) a jejich důsledkem vzlínavost (působením kapilárních sil jsou pájené součásti schopny vést pájku úzkým prostorem proti směru gravitační síly). K dosažení dobré smáčivosti používáme tavidla, která jsou buď součástí pájky anebo je na pájenou plochu součástí nanášíme zvlášť. Podle teploty tavení pájky můžeme pájení rozdělit na tzv. měkké (do 450 °C) a tvrdé (nad 450 °C) [1].

1.1 Pájky

Jedná se o kovy nebo jejich slitiny, které v roztavené formě spojují pájené součásti. Můžeme je rozdělit podobně jako typy pájení na *měkké* (s teplotou tání do 450 °C) a *tvrdé* (s teplotou tání nad 450 °C).

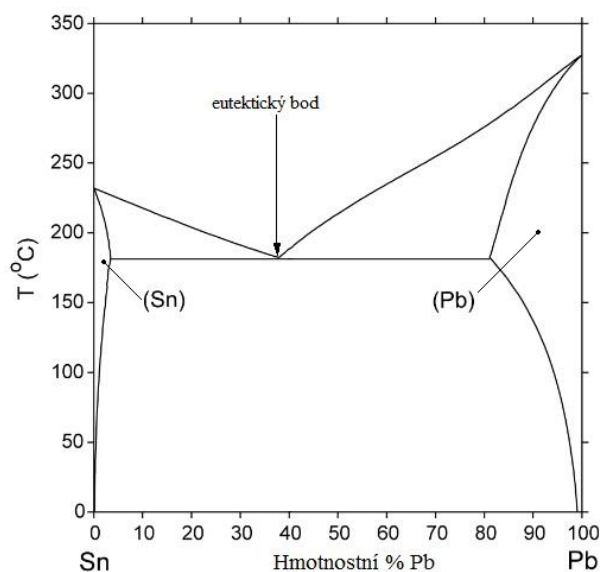
Měkké pájky nejčastěji obsahují cín, slitiny cínu a olova nebo slitiny cínu a mědi. Jako příměsi se používá stříbro (pro výbornou elektrickou vodivost a pevnost), kadmium nebo bismut (využívá se pro výrazné snížení teploty tání směsi). Pomocí speciálních slitin (80 % kadmia a 20 % zinku) je možné pájet i hliník nebo ocel, které patří mezi obtížně pájitelné kovy. Pájky se prodávají ve formě drátů či trubiček (s tavidlem) nebo pasty s pájkou a tavidlem. Spoje vytvořené s pomocí měkkých pájek se využívají v elektrotechnice převážně pro vedení signálu a nejsou vhodné pro velké mechanické namáhání.

Tvrdé pájky mají nejčastěji vysoký obsah stříbra. Dále obsahují měď, zinek, případně hliník nebo cín. Oproti měkkým pájkám jsou určeny pro použití v podmínkách, kde je kladen důraz na vyšší odolnost v mechanickém a tepelném namáhání. Prodávají se ve formě trubiček (s tavidlem), drátů, tyčí nebo housek.

V současné době se upouští od používání příměsí, které obsahují nebezpečné složky (olovo, kadmium, rtuť apod.) ve spotřební elektronice kvůli vlastnostem poškozujícím životní prostředí (direktiva RoHS [2]).

1.1.1 Olovnaté pájky pro měkké pájení

V případě pájek jako slitin kovů se musí vždy jednat o tzv. eutektickou směs, která vznikla společným tuhnutím obou látek současně – díky tomu má slitina nižší teplotu tání než jednotlivé kovy v ní rozpuštěné. Nejčastěji se v elektrotechnice při pájení používá slitina olova a cínu. Složení této pájky se pohybuje od 60 % cínu se 40 % olova do 65 % cínu se 35 % olova. Změření a zakreslení závislosti tuhnutí látek na jejich vzájemné koncentraci vede k sestavení fázového diagramu eutektické směsi, zobrazeném na (Obr. 1.)



Obrázek 1 - Fázový diagram slitiny cínu a olova

Eutektický bod je místo s nižší teplotou tání, než mají obě složky směsi a dosahuje teploty 183 °C. V oblasti pod tímto bodem je slitina v pevném skupenství a její krystaly jsou vzájemně promíchané (solidus) – na rozdíl od oblasti nad bodem, kde je ve skupenství kapalném (liquidus). Eutektická směs pájky má ve své struktuře při koncentraci 62 % cínu s 38 % olova vzájemně promíchané krystalky cínu a olova a dostává tím zvláštní mechanické vlastnosti, které výrazně usnadňují pájení. Nicméně povrch pájených ploch součástí musí být odmaštěný a nezoxidovaný, aby ho bylo možné snadno smáčet pájkou [3].

Olovnaté pájky patří mezi snadno pájitelné, protože mají nižší bod tání než bezolovnaté pájky a při přechodu z kapalně do pevné fáze vytvářejí ideální krystalickou strukturu. Podle zbarvení povrchu pájeného olovenými pájkami lze snadno určit, s jakou kvalitou je spoj zapájen – kvalitní spoj je určen lesklou barvou s jemnou strukturou. Pokud má pájka matný odstín a hrubý povrch se zvětšenými krystaly, pravděpodobně se jedná o přepálenou pájku. V porovnání s pájkami bez olova jsou spoje s olovnatými pájkami spolehlivější a odolnější vůči mechanickému namáhání. Proto se z těchto důvodů

stále využívají ve zdravotnictví a v automobilovém a leteckém průmyslu, kde jsou spoje více zatížené otřesy a vibracemi.

1.1.2 Bezolovnaté pájky pro měkké pájení

V těchto pájkách je olovo nahrazováno jiným kovem, nejčastěji stříbrem nebo mědí.

Kvůli vyššímu obsahu cínu (min. 60 %) mají tyto pájky:

1. Vyšší bod tání (nejčastěji v rozmezí 190 – 230 °C) a tím zvýšené teplotní namáhání součástek
2. Lepší smáčecí vlastnosti
3. Tendenci k rychlejší oxidaci

Vzhledem k tomu, že bezolovnaté pájky jsou tekuté v mnohem užším rozsahu teplot než olověné, je nutné zvýšit přesnost procesů pájení, aby nedocházelo k přepalování pájky nebo tavidla. Většina spojů zapájená bezolovnatými pájkami má totiž matnou barvu a bylo by mnohem těžší odlišit, zda je spoj kvalitně zapájený či nikoliv. Pro snížení vysokého bodu tání jsou vhodné příměsi bismutu, oxidaci je možné zabránit pájením v ochranné atmosféře dusíku nebo ve vakuu.

Další varianty pájek s jejich vlastnostmi a použitím jsou uvedené v (Tab. 1.).

Složení [%]	Teplota tání [°C] (solid, liquid)	Vlastnosti, použití
Sn 99,3 Cu 0,7	227	Nižší náchylnost k oxidaci
Sn 99 Cu 1	183 – 190	Pro pájení těžce pájitelné elektroniky
Sn 96,5 Ag 3 Cu 0,5	217 – 220	Vyšší teplota tání, větší pevnost spojů, vyšší odolnost k oxidaci
Sn 99 Ag 0,3 Cu 0,7	217 – 228	Strojní a ruční pájení
Sn 97 Cu 3	227 – 310	Strojní a ruční pájení
Sn 96 Ag 4	221	Pájka je eutektická, zůstává jasná a lesklá
Sn 97 Ag 3	221 – 224	Pro pájecí lázně
Sn 42 Ag 1 Bi 57	137, 204	Pasta pro součástky citlivé na teplo
Sn 42 Bi 58	139, 141	Pasta pro součástky citlivé na teplo, snížená smáčivost

Tabulka 1 - Bezolovnaté pájky (různí výrobci)

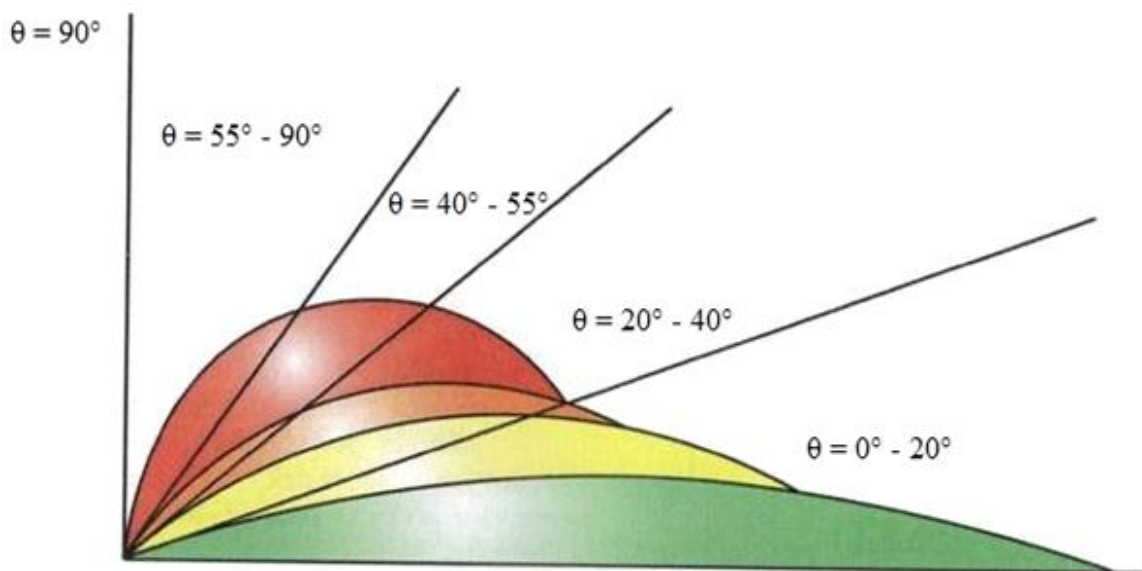
Oproti olověným pájkám jsou jejich spoje méně odolné vůči mechanickým nebo vibračním vlivům, proto se využívají převážně ve spotřební elektronice.

1.1.3 Smáčivost a vzlínavost

Smáčivostí se označuje vlastnost kapaliny udržovat kontakt s pevným povrchem. Jedná se o výsledek vzájemného ovlivňování atomů pájené plochy a kapaliny, které klesá volná povrchová energie. Proces můžeme rozdělit do více fází:

1. Při pájení se roztavená pájka rozlévá po pájené ploše. Atomy z pájky přecházejí do krystalové mřížky pevného kovu a vytvářejí zde kovovou vazbu. Pokud atomy vazbu nevytvoří, nedojde ke smáčení povrchu.
2. Následuje difuze spojovaných kovů, kdy atomy zaujímají polohu v krystalové mřížce. Na hloubce vniku atomů do mřížky závisí pevnost vazby – pokud je dostatečná, pájka dokonale lne k povrchu. V opačném případě dochází k *odsmáčení*: na pájené ploše zůstane pouze vrstva cínu (má větší pájitelnost než olovo) a po dostatečném vychladnutí se už k pájce nedokáže navázat.
3. V poslední fázi dochází k chladnutí spoje a krystalizaci pájky. Začínají se vytvářet zrna pájky a jejich velikost je daná rychlostí ochlazování: čím je ochlazování rychlejší, tím jsou zrna menší a méně nám ovlivňují pevnost pájeného spoje.

Roztavená pájka má tendenci zaujímat na volném prostoru co nejmenší plochu. Podle úhlu θ , který svírá s podložkou, rozlišujeme různé stupně smáčení, uvedené v (Obr. 2.).



Obrázek 2 - Smáčivost povrchu pájkou

- *Dokonalé smáčení* ($\theta = 0^\circ - 20^\circ$): Pájka pokrývá rovnoměrně povrch v tenké vrstvě a její povrchová energie je nižší než energie podložky. Čím je povrch pájky hladší, rovnoměrnější a má menší tloušťku, tím je proces smáčení kvalitnější.
- *Dobré smáčení* ($\theta = 20^\circ - 40^\circ$): Pájka pokrývá rovnoměrně povrch tlustší vrstvou než v předchozím případě.
- *Postačující smáčení* ($\theta = 40^\circ - 55^\circ$): Pájka pokrývá povrch tlustou vrstvou. Tento stupeň smáčení je ještě považovaný za vyhovující.
- *Špatné smáčení* ($\theta = 55^\circ - 90^\circ$): Pájka zůstává na povrchu ve formě kapky. Příčinou může být její velká povrchová energie nebo zoxidovaný či mastný povrch.
- *Nesmáčení* ($\theta = 90^\circ - 180^\circ$): Povrch pájky se snaží zaujmout na podložce tvar koule (má nejmenší styčnou plochu s podložkou). Jedná se o případ nesmáčení povrchu.

Z hlediska smáčení může dále nastat případ *částečného smáčení*, kdy pájka pokrývá nedokonale povrch a objevují se zde oblasti smáčené i nesmáčené.

Smáčivost spolu s *teplotními požadavky na pájené součástky* (jejich pájená plocha se musí ohřát na požadovanou teplotu během dané doby) a *odolnosti vůči teplu při pájení* (teplotní namáhání nesmí poškodit ani ovlivnit funkci součástek před definovaným limitem) tvoří komplexní vlastnosti, které se v kontextu pájení nazývají *pájitelností*. Ta ovlivňuje většinu pájených spojů na DPS nebo v elektronických zařízeních. Snahou je minimalizovat nebo zamezit těmto negativním vlivům při pájení. Vzhledem k tomu, že teplotní požadavky na součástky a odolnosti spojů vůči teplu jsou konstrukčně předem dané, můžeme upravit smáčivost povrchů. K této úpravě používáme tavidla.

1.1.4 Tavidla

Tavidla jsou tuhé nebo kapalné látky, které čistí zoxidované plochy před tím, než jsou spojeny samotnou pájkou, a urychlují tím proces smáčení. Mohou být součástí pájky anebo se nanášejí na pájenou plochu před pájením. Kvůli účinnému působení musí být reakční teplota tavidel nižší než teplota pájky. Když se na tuto teplotu tavidlo zahřeje, redukuje oxidové vrstvy z povrchu pájené plochy a zvyšuje tím její povrchové napětí. Zároveň chrání před další oxidací. Mezi nejčastěji používaná tavidla pro měkké pájení patří kalafuna, která se vyrábí destilací pryskyřice z borovic. Do tavidel se pro zvýšení čistících schopností přidávají aktivátory. Ty se při zvýšení teploty stávají slabými kyselinami a pomáhají urychlit rozklad oxidů.

Tavidla je možné rozdělit podle různých kritérií, která jsou uvedena v (Tab. 2.).

Typ tavidla	Základní složka	Stupeň aktivace	Další označení
Pryskyřicové	Kalafuna	R RMA	NC WS
	Syntetická pryskyřice	RMA/RA RA RSA	
Organické	Rozpustné ve vodě	R RMA	NC WS
	Ner rozpustné ve vodě	RMA/RA RA RSA	
Anorganické	Soli	Chlorid amonný (NH_4Cl)	WS
	Kyseliny	Kyselina fosforečná (H_3PO_4)	
	Zásady	Jiné kyseliny Aminy	

Tabulka 2 - Rozdělení tavidel [1]

Označení stupně aktivace, začínající písmenem „R“, je dané americkou vojenskou normou (MIL). Tato norma bohužel neobsahuje pravidla o čištění zbytků tavidla, upřesnění dávají další označení nebo norma DIN.

- **R**
Toto tavidlo neobsahuje aktivátor. Skládá se nejčastěji z kalafuny, která může být rozpuštěna v lihovém ředidle. Má slabou čisticí schopnost a používá se na čištění snadno pájitelných povrchů. Zbytek tavidla je netečný, nevodivý a neagresivní k pájeným plochám, takže nemusí být po pájení odstraněn.
- **NC (no-clean)**
Toto tavidlo obsahuje kalafunu, rozpouštědlo a slabé množství aktivátoru. Je vhodné pro čištění snadno pájitelných ploch. Zbytky tavidla není nutné po pájení odstranit.
- **RMA**
Složení tavidla je obdobné jako v předchozím případě. Zbytky tavidla jsou netečné, nevodivé a neagresivní k pájeným plochám. Rozhodnutí o tom, zda je odstranit či nikoliv, je ponecháno na uživateli.
- **RMA/RA**
V tavidle jsou obsaženy halogenové aktivátory, které jsou agresivnější než aktivátory v předchozím případě. Tavidla tohoto typu se označují jako mírně až středně aktivní. Čištění je doporučeno.

- **RA**
Toto tavidlo obsahuje agresivnější aktivátory než tavidla RMA/RA. Označuje se jako plně aktivní. Po ošetření pájených ploch je s ním možné pájet materiály, které se nedají pájet s předchozími tavidly. Po pájení je nezbytně nutné odstranit všechny jeho zbytky doporučeným rozpouštědlem, aby nedocházelo ke korozi a poškození pájených ploch agresivními látkami.
- **RSA**
Jedná se o tavidlo se silně aktivovanými aktivátory (označované jako superaktivované). Po pájení je nutné věnovat zvýšenou pozornost u odstraňování všech zbytků tavidla, aby nedošlo ke korozi a poškození pájených ploch agresivními látkami.
- **WS (*water-soluble*)**
Tavidlo je složeno z anorganických nebo organických halogenidů či kyselin. Je určeno pro pájení na nejobtížněji pájených plochách. Jeho zbytky po pájení je nutné co nejrychleji omýt vodou [4] [5].

Vzhledem k dobré pájitelnosti DPS, SMD a vývodových součástek není nutné používat vysoce aktivovaná tavidla. Je však doporučeno používat tavidla v dostatečném množství a pro odstranění jejich zbytků po pájení dodržovat postupy dané výrobcem.

1.2 Ruční pájení

Ruční pájení patří mezi nejstarší pájecí metody. Vzhledem k rychlému vývoji integrace vývodových součástek do menších pouzder a zmechanizované průmyslové výrobě jeho využívání ustupuje do pozadí. Je ovlivněno subjektivními faktory (zručnost a rychlost pracovníka) a v jednom čase s ním lze pájet pouze jednu součástku – jedná se o lokální pájení. Dnes se průmyslově používá převážně pro opravu jednotlivých částí DPS nebo součástek, které nelze zapájet jinými metodami.

Ruční pájení lze rozdělit podobně jako pájky na *tvrdé* a *měkké pájení*.

1.2.1 Tvrdé a měkké pájení

K *tvrdému ručnímu pájení* se nejčastěji používají varianty plynové páječky (Obr. 3), které jsou schopné dosáhnout teploty nad bodem tavení tvrdé pájky (nad 450 °C). Jejich výhodou je mobilnost a možnost pracovat bez připojení na elektrickou síť díky vlastní plynové náplni.



Obrázek 3 – Varianty plynové páječky pro tvrdé pájení [6] [7]

Lze použít i elektrickou páječku, uvedenou níže, pokud ovšem umožňuje dosáhnout teploty nad bodem tavení tvrdé pájky.

K *měkkému ručnímu pájení* se nejčastěji používá transformátorová páječka (jinak nazývaná „trafopájka“ nebo „pistolová“ páječka), elektrická páječka nebo pájecí stanice (Obr. 4).



Obrázek 4 - Transformátorová páječka, elektrická páječka a pájecí stanice

Transformátorová páječka využívá k ohřevu malé napětí o vysokém proudu. Její hrot – smyčku z měděného drátu – je možné si představit jako výstupní vinutí s jedním závitem vůči vstupnímu vinutí – transformátoru – s mnoha závity. Vlastní ohřev hrotu trvá pouze po dobu stisknutí tlačítka.

- Výhody: rychlý ohřev pájecího hrotu (max. několik sekund).
- Nevýhody: rychlý nárůst proudu za krátký čas může poškodit součástky citlivé na elektrostatické výboje, nemožnost regulace teploty, vyšší váha (neobratnost při pájení).

Elektrická páječka má v těle umístěné odporové topné těleso, které zahřívá hrot. Ten je složený nejčastěji ze slitin mědi (pro dobré vedení tepla). Jeho povrch je poniklovaný, protože měď by neodolávala kyselosti pájek a jejich příměsí. Hrot je výměnný, lze si vybrat z různých velikostí a tvarů. Zahřívání je spuštěno připojením páječky na síťové napětí.

- Výhody: tenčí hrot umožňuje pájet i menší součástky.
- Nevýhody: nemožnost regulace teploty.

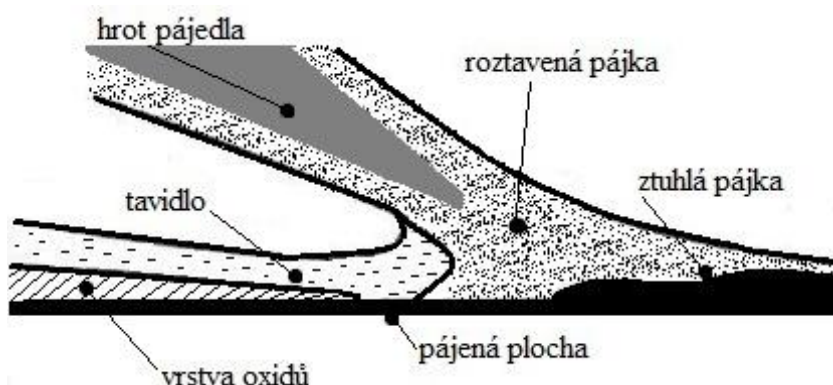
Pájecí stanice patří mezi komplexní řešení pájení. Její základní provedení zahrnuje elektrickou páječku s regulací teploty, která umožňuje pájet různé typy pájek, spojů a součástek s užším doporučeným rozsahem teplot pájení. Rozšířené provedení může obsahovat LED displej se zobrazováním aktuální a nastavené teploty, horkovzdušnou páječku pro tvrdé pájení nebo stanici k odsávání pájky.

- Výhody: regulace teploty, použité příslušenství.
- Nevýhody: vyšší cena.

1.2.2 Postup měkkého pájení

Pro kvalitně zapájený spoj se doporučuje zvolit k materiálu pájené plochy vhodnou trubičkovou pájku s tavidlem, případně použít tavidlo zvlášť. Ideálně by měla být teplota hrotu pájky o 80 °C vyšší, než teplota eutektické směsi cínu a olova (183 °C). Důležité je odhadnout z konzistence roztavené pájky, zda je vhodná k pájení a jestli není přepálená. Při teplotě, která je o více než 100 °C vyšší než teplota pájky v eutektickém stavu, dochází k rychlé oxidaci pájky a zničení tavidla. Pájecím hrotem (na kterém je před pájením nanášena vrstva pájky pro lepší kontaktní vlastnosti) je zajištěno prohřátí pájených součástí. Hrot by neměl pájku zahřívát přímo, ale přes ohřáté součásti. Měl by být čistý a nezoxidovaný. Doba prohřívání pájených ploch se liší velikostí součástek, jejich pájitelností a rozsahem teplot, určeným výrobcem.

Průběh ručního pájení je vidět na (Obr. 5.).



Obrázek 5 - Průběh ručního pájení

Při pájení obtížněji pájitelných součástek je vhodné před pájením nanést na pájené plochy tavidlo v tekuté formě. Pokud to rozměry součástek nebo jejich doporučený rozsah teplotního namáhání dovolí, je možné plochy pocínovat (vytvořit na nich páječkovou vrstvu pájky).

Dodržováním doporučených teplot pájení pájky, podmínek skladování součástek a DPS, dostatečného prohřátí pájených ploch a používáním tavidla lze předcházet negativním vlastnostem tzv. *intermetalických sloučenin*. Jedná se o vrstvy, které se vytvoří mezi pájkou a pájenými součástmi během difuze. I když jejich tenká celistvá vrstva je jedním z předpokladů pevnosti spoje, není jejich větší výskyt žádoucí, protože snižují pájitelnost. Jejich krystalová mřížka je tvořena převážně nekovovými atomy a z tohoto důvodu mají tyto vrstvy sníženou elektrickou vodivost. Nejdůležitější vlastností, ovlivňující spolehlivost pájeného spoje, není jejich tloušťka (narůstá exponenciálně s časem a je přímo úměrná teplotě pájení), ale velikost krystalů, které ji tvoří.

Při nesprávném procesu pájení, vzniklé intermetalické vrstvě a přítomnosti oxidů může snadno dojít k vytvoření tzv. „studeného spoje“, který má nízkou elektrickou vodivost a malou mechanickou pevnost.

1.3 Strojní pájení

Jedná se o nejvyužívanější pájení v průmyslové výrobě. Oproti ručnímu pájení se jedná o pájení plošné, tudíž je rychlejší a úspornější vzhledem k používaným materiálům (pájky, tavidla), energiím a lidským zdrojům. Navíc obsluha zařízení pro strojní pájení nevyžaduje vysokou kvalifikaci pracovníků a výsledky strojního pájení jsou snadno reprodukovatelné.

Díky průběžné kontrole celého plně automatizovaného procesu pájení je možné zajistit zvyšování kvality finálního výrobku.

V praxi se nejčastěji využívá pájení vlnou a pájení přetavením, protože splňují požadavky elektrotechnického průmyslu. Další metody (pájení pomocí laseru, ultrazvuku nebo ponorem) jsou využívány převážně ke speciálním aplikacím.

2 Pájení přetavením

Jedná se o jeden z nejčastěji průmyslově využívaných pájecích postupů, který je vhodný pro pájení SMD součástek a integrovaných obvodů. Ty se osazují na pájené plochy DPS do pájecí pasty (směs mikročástic pájky a tavidla), případně se pro větší stabilitu při manipulaci přilepí lepidlem. Následně je pájecí pasta přetavena o teplotě vyšší, než je teplota tání samotné pájky v pastě.

Pro přetavení lze využít nejrůznějších technologických postupů s různými typy ohřevu: pomocí infračerveného záření, topného tělesa nebo laseru a různými přenosovými médii: vzduchem, kondenzovanými parami, vakuem nebo přímým kontaktem s vyhřívaným nástrojem.

Pájení přetavením umožňuje pájet DPS, které jsou osazené SMD komponenty z jedné nebo z obou stran. V případě dvoustranně osazené DPS probíhá zapájení na obou stranách současně, takže je tato metoda rychlejší než pájení vlnou. Je také úspornější – vzhledem k přesným dávkám pájecí pasty, které jsou aplikovány v malém množství na pájené plochy.

2.1 Druhy přenosu tepla

Z fyzikálního hlediska lze při pájení přetavením využít všechny způsoby přenosu tepla:

- vedení (kondukce),
- proudění (konvekce),
- záření (radiace).

2.1.1 Vedení (kondukce)

Každé těleso má určitou teplotu. Jedná se o vlastnost, která vyjadřuje míru pohybu částic kolem svých rovnovážných poloh (částice se nepřemísťují). Pokud mezi dvěma tělesy, které mají rozdílnou teplotu, dojde ke kontaktu, částice teplejšího tělesa předávají část své kinetické energie částicím chladnějšího tělesa. Přenos tepla je pak nezávislý na skupenství.

Tepelný tok q – množství tepla, které projde plochou S za určitý časový interval – se určí ze zjednodušeného vztahu jednodimenzionální formy Fourierova zákona.

$$q = \frac{\lambda S \Delta T}{L} [W] \quad (2.1.1)$$

q – tepelný tok, W

λ – tepelná vodivost materiálu, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

S – plocha, kterou prochází teplo, m^2

$\Delta T/L$ – teplotní gradient, $K \cdot m^{-1}$

Tento vztah představuje jistou analogii ve spojení s Ohmovým zákonem (q – proud, ΔT – rozdíl napětí, $L/\Delta S$ – odpor).

Při přenosu tepla vedením se pájené plochy zahřívají od pouzder součástek. Nejefektivnějšího využití proto dochází v případě pájení materiálů s dobrou tepelnou vodivostí.

2.1.2 Proudění (konvekce)

Jedná se o přenos tepla pohybem početně neurčené skupiny molekul plynů nebo kapalin. Teplo se přenáší rychleji a intenzivněji, protože se jedná o pohyb celé skupiny, ve kterém je zahrnutý i pohyb jednotlivých částic (vedení je součástí proudění).

Konvekci je možné rozdělit na přirozenou nebo nucenou.

- Přirozená konvekce je důsledkem působení gravitace na rozdílnou hustotu kapaliny nebo plynu – řidší části stoupají směrem nahoru, hustší části klesají směrem dolů.
- Nucená konvekce je vytvořena pomocí ventilátorů nebo čerpadel. Lze ji využít pro větší přenos tepla.

Lze ji vyjádřit ze vztahu (2.1.2):

$$q^c = h^c S (T_s - T_a) [W], \quad (2.1.2)$$

kde:

q^c – přenos tepla prouděním z povrchu do okolí, W

h^c – koeficient konvekčního přenosu tepla, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

S – plocha, m^2

$(T_s - T_a)$ – rozdíl teploty povrchu T_s a teploty okolí T_a , K

Rovnice jako v předchozím případě představuje jistou analogii s Ohmovým zákonem (q – proud, ΔT – rozdíl napětí, $1/h^c S$ – odpor).

2.1.3 Záření (radiace)

V tomto přenosu tepla se tepelná energie přenáší zářením, tj. elektromagnetickým vlněním. Množství tepelné energie lze vyjádřit vztahem 2.1.3:

$$q = \varepsilon k(T_1^4 - T_2^4) [W], \quad (2.1.3)$$

kde:

q – množství tepelné energie,

ε – koeficient vyzařování,

k – Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8}$, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,

T_1, T_2 – různé teploty dvou těles, mezi kterými se energie přenáší [1].

2.2 Metody pájení přetavením

Z hlediska způsobu ohřevu je možné pájení přetavením rozdělit na více metod:

- konvekční ohřev (pomocí horkého vzduchu nebo dusíku),
- infraohřev (pomocí infračerveného záření),
- kondenzační ohřev (pájení v parách),
- pomocí laseru a kontaktních metod.

Z výše uvedených metod se nejčastěji používá metoda konvekčního ohřevu, kde jsou DPS osazené SMD v pájecí pastě ohřívány pomocí horkého vzduchu nebo jiného plynu. Ostatní metody jsou využívány méně.

Jednotlivé metody lze porovnat mezi sebou v závislosti na jednotlivých parametrech, uvedené v Tab. 3.

Parametr	Konvekční ohřev	Infraohřev	Kondenzační ohřev
Řízení procesu	Velmi dobré	Dobré	Výborné
Pracovní teplota	Regulovatelná	Regulovatelná	Pevná
Homogenita pracovní teploty	Dobrá	Špatná	Velmi dobrá
Maximální teplota	Špatně definovatelná	Špatně definovatelná	Pevná
Univerzálnost	Dobrá	Ucházející	Velmi dobrá
Citlivost na barvu materiálu	Malá	Velká	Žádná

Tabulka 3 - Porovnání metod pájení přetavením [1]

2.3 Konvekční pájení

Ke konvekčnímu pájení se používají pece a využívá se v nich jak přirozené, tak nucené konvekce. Nucené konvekce se dosahuje použitím ventilátorů nebo čerpadel, a protože při tomto typu proudění je šíření tepla rychlejší, využívá se jí častěji.

Pájecí pece pro konvekci lze rozdělit na dva typy. Prvními z nich jsou *vsázkové pece* (na Obr. 6). Ty mají menší rozměry, jsou určeny pro malosériovou výrobu a proudění v nich je regulováno ventilátory.



Obrázek 6 - Vsázková pájecí pec [8]

Druhým typem jsou *průběžné pece* (in-line). Mají větší rozměry než vsázkové, jsou určeny pro velkosériovou výrobu a postupné ohřívání je zajištěno pomocí přetavovacích zón, kterými prochází dopravníkový pás. Zónami se minimalizují rozdíly teplot v jednotlivých fázích pájení a je jimi zajištěna vyšší homogenita celého ohřevu. Projíždějící DPS se první zónou předehejí, dalšími jsou zapájeny a poslední zónou se ochladí. Tím je možné celý proces pájení výrazně urychlit.

Pro přetavení pájecí pasty se využívá horký vzduch nebo dusík. Jejich cirkulace uvnitř pece je umožněna buď pomocí ventilátoru, nebo pomocí sady trysek, kterými lze proud vzduchu či dusíku usměrnit, případně regulovat rychlost průtoku. Trysky jsou podle funkce rozděleny na přivádějící horké médium nebo odvádějící částečně ochlazené médium – z důvodu zamezení šikmému či horizontálnímu proudění, které by mělo vliv na posun součástek nebo na vznik hraničních vrstev mezi teplým a studeným médiem. V případě použití dusíku je výhodou snížená oxidace během procesu pájení, kvůli které odpadá použití vysoce aktivovaných tavidel a zároveň celý proces probíhá se zlepšenou pájitelností. Vzhledem k malé citlivosti na barvu materiálu a dobré homogenitě pracovní teploty lze pájet DPS s velkou hustotou součástek. Také nedochází k zastíňování menších komponentů většími. V případě průběžné pece lze podle změny rychlosti pohybu dopravního pásu snadněji regulovat pájecí profil.

Ten spolu s volbou pájecí pasty patří mezi nejovlivnitelnější prvky celého procesu pájení přetavením, ve snaze dosáhnout co nejvyšší kvality zapájených spojů.

- Výhody: menší spotřeba pájecí pasty než při pájení vlnou, možnost pájet DPS s velkou hustotou součástek, homogenita pracovní teploty.
- Nevýhody: vyšší energetická spotřeba, nižší účinnost (30 % – 40 %), zvýšená pravděpodobnost oxidace pájených spojů (při pájení horkým vzduchem).

2.4 Pájení pomocí infračerveného záření

V této technologii se k pájení využívá energie, vyzářená IR zářiči. Tato energie je součástí elektromagnetického spektra a nepotřebuje ke svému šíření žádné médium. Množství tepla, které zahřívá osazené DPS, je ovlivněno barvou povrchu a vyzářovanou vlnovou délkou IR zářiče. Vzhledem k tomu, že se zvyšující se vlnovou délkou klesá absorpce záření, jsou součástky s tmavým povrchem zahřívány více než pájecí pasta a další světlejší místa. Z tohoto důvodu mohou být součástky s tmavým povrchem více namáhány, než dojde k přetavení pájecí pasty. Tento efekt lze zmírnit použitím IR zářiče s širším rozsahem vlnových délek – poté je zahřívání méně závislé na infračerveném záření ze vzdáleného konce spektra. Vzhledem k tomu, že záření na osazené DPS dopadá přímočaře, dochází ke stínění menších součástek většími. Částečně lze tento efekt eliminovat zavedením nucené konvekce ventilátory (k přirozené konvekci zde dochází také, protože infračervené pece obsahují vzduch).

Pájení probíhá v infračervených pecích, které jsou nejčastěji konstruovány jako *průběžné* (na Obr. 7). IR zářiče jsou umístěny nad i pod dopravníkovým pásem a jsou uspořádány v jednotlivých přetahovacích zónách. Výkon zářičů lze přímo regulovat pomocí jejich příkonů, takže toto ovládání není složité na obsluhu. K nastavení pájecího profilu infračervených průběžných pecí se využívá teploty jednotlivých přetahovacích zón a rychlosti posuvu dopravníkových pásů.



Obrázek 7 - Průběžná infračervená pec [9]

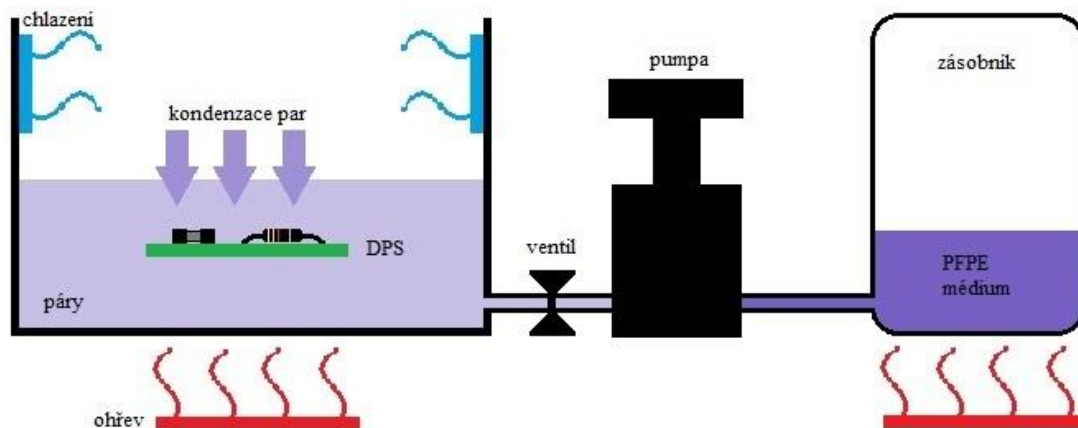
Vsázkové infračervené pece slouží převážně pro malosériové využití. V nich se používá IR zářič v kombinaci s konvekcí.

Nastavení pájecího profilu infračervených pecí bývá složitější vzhledem k většímu počtu faktorů, ovlivňujících výslednou teplotu – barva součástek, jejich hustota a rozmístění, typy montáže, typ pájecí pasty a velikost DPS.

- Výhody: vysoká účinnost procesu (60 % – 70 %).
- Nevýhody: nehomogenní ohřev osazené DPS (lze částečně kompenzovat širokospektrým IR zářičem nebo nucenou konvekcí ventilátory).

2.5 Kondenzační pájení (pájení v parách)

DPS jsou osazeny součástkami v pájecí pastě jako v předchozích technologiích. Po předehřátí jsou ponořeny do nasycených par perfluoropolyetheru (PFPE), které se skládají z atomů uhlíku, fluoru a kyslíku. Ty jsou zahřáté na teplotu varu, která je vyšší než teplota přetavení pájky. Energií, kterou se uvolní skupenské teplo při přechodu média z plynného do kapalného stavu (kondenzace), se pájka přetaví. Chlazení zamezuje únik média a slouží k jeho cirkulaci. Regulace množství páry je realizována pomocí pumpy s ventilem (Obr. 8).



Obrázek 8 - Princip kondenzační pece

Pece pro kondenzační pájení jsou opět konstruovány jako *vsázkové* nebo *průběžné*. Pracovní teplota pájení je určena varem média, které probíhá na přesně dané teplotě (vzhledem k povaze média nastavitelná v rozmezí 155 °C – 280 °C). Díky tomu součástky netrpí zvýšeným tepelným namáháním.

K ohřátí není zapotřebí velké množství energie, protože měrné skupenské teplo varu média je pouze $68 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (pro srovnání: u vody $2257 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Šíření tepla je rychlé a nezávislé na geometrických tvarech – nedochází ke stínění menších součástí většími. V některých typech kondenzačních pecí je při roztavení pájky možné vytvořit vakuum. Tím je zamezen vliv oxidace, vytvoření bublinek v pájeném spoji a odpadá nutnost použití vysoce aktivovaných tavidel.

- Výhody: homogenní ohřev, velká účinnost, žádná oxidace, vysoká kvalita zapájených spojů.
- Nevýhody: špatná biologická odbouratelnost (při zahřívání vznikají páry fluorovodíku), vysoká cena.

2.6 Pájení pomocí laseru

Přetavení pájecí pasty je způsobeno tepelnými účinky dopadajícího laserového záření, se kterým lze pájet všechny typy montáží kromě pouzder BGA. Ohřev probíhá velmi krátkou dobu, od stovek milisekund do 2 sekund (v závislosti na velikosti pájené součástky, množství pájecí pasty a geometrii spoje). Tím se součástky zbytečně nepřehřívají a nevytvoří se velké množství intermetalických sloučenin. Toto pájení lze označit jako bodové, protože laserový paprsek pájí v jednom čase jeden pájecí bod. Pohyb laseru mezi pájecími body je možné přesně a účelně naprogramovat, aby se zkrátila pájecí doba v určité oblasti DPS. Při pájení laserem se může použít pájecí pasta i trubičková pájka.

Vlastní laser pro pájení může být dvojího typu: buď *pulzní (YAG)* nebo *plynový (CO₂)*. *Pulzní laser* generuje laserový paprsek o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$. Jeho záření proniká sklem a plasty, takže má tu výhodu, že laser není nutné vypínat při pohybu mezi jednotlivými pájecími body. *Plynový laser* emituje vlnovou délku laseru $10 \mu\text{m}$. Toto záření je však pohlcováno nejen kovy, ale i plasty, tudíž je nutné ho při pohybu mezi jednotlivými pájecími body vypínat. Je účinnější než pulzní laser (pájka absorbuje záření tavidlem) a při pájení je třeba dávat pozor na odrazy paprsku [10].

- Výhody: minimální teplotní zatížení součástek, možnost pájet různé typy pájecích past a pájek v širokém rozsahu pájecích teplot.
- Nevýhody: nízká rychlost u plynového laseru (vzhledem k pájení bod po bodu), vysoká cena.

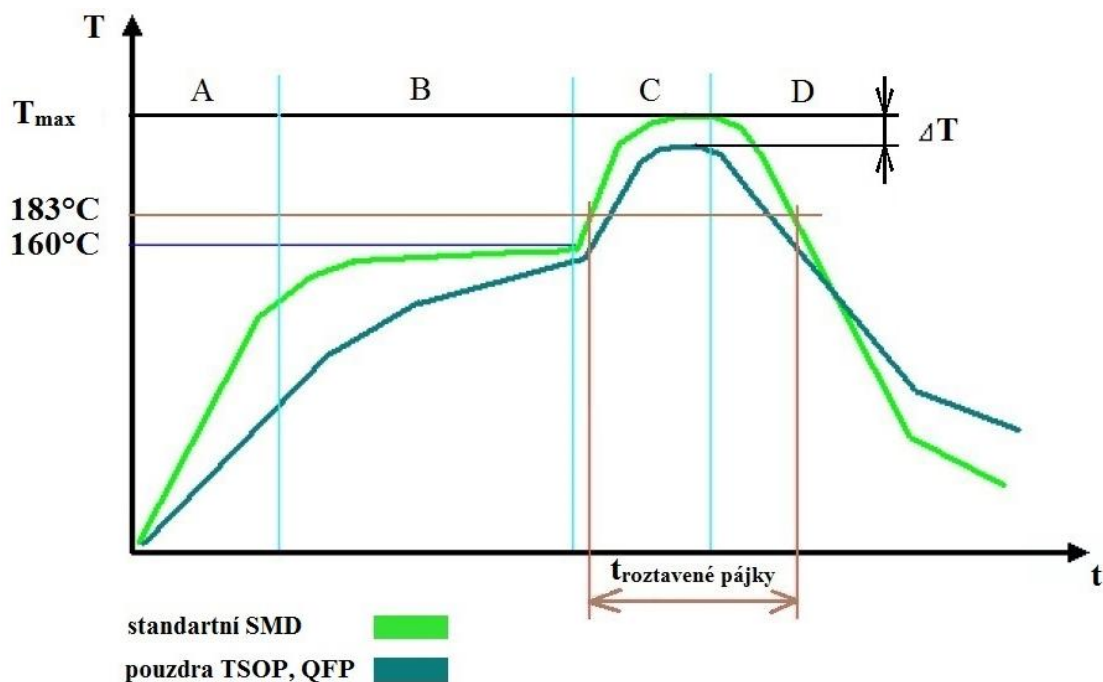
2.7 Teplotní profil

Jedná se o časovou závislost měnící se teploty v průběhu pájení přetavením, kterou je možné zobrazit do podoby grafu. Správně nastavený teplotní profil brání vzniku defektů v pájených spojích i součástkách (dutiny v pájce, zvětšená zrna pájky, prasklé pájené spoje apod.) a je podmínkou kvalitně provedeného spoje s dlouhou životností. Existují dva typy teplotních profilů.

- *Příčný*: popisuje nehomogenní prostor pájecí pece v příčném směru během procesu pájení. Je dán hustotou součástek, rozmístěných na DPS a konstrukcí pece. Je nutné ho sledovat pouze při náročnějších aplikacích a příkladným způsobem orientovat pájené DPS.
- *Podélný*: vyjadřuje závislost teploty na čase v podélném směru pájení v pájecí peci. Využívá se k nastavování doby: předehřátí, aktivace tavidel, přetavení pájecí pasty a k závěrečnému chlazení. Je závislý na typu pájecí pasty, na velikosti DPS a na hustotě, velikosti i barvě osazovaných součástek.

2.7.1 Použití pájecích past s olovem

Vzájemné porovnání podélných pájecích profilů olověných pájecích past pro různé typy součástek je na Obr. 9 (sedlový profil je typu RSS).



Obrázek 9 - Pájecí profily olověných past s různým složením

Graf je po časové ose rozdělen na jednotlivé teplotní zóny. A – předehřívací zóna, B – vyrovnávací zóna, C – přetavovací zóna, D – chladicí zóna.

Předehřívací zóna slouží k odstranění vlhkosti ze součástek a DPS. Vlivem zvyšování teploty v ní dochází k vypařování rozpouštědla, které je obsaženo v tavidle nanesené pájecí pasty. V této zóně se tvoří většina defektů, nejčastěji z důvodu příliš prudkého nárůstu teploty. Přímým důsledkem je teplotní rozvíbrování molekul, které jsou zodpovědné za vznik bublinek v pájených spojích. Proto by nárůst teploty neměl být větší než $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$. Ten je ovlivněn barvou součástek, jejich použitými materiály a rozměry. Při těchto vyšších teplotních nárůstech dochází k rychlému vypařování rozpouštědel v tavidle, které překonávají kohezní síly v pájecí pastě a ta pak vytváří shluky pod součástkami. Jedním z řešení je snížit nárůst teploty v intervalu $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1} - 1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, který minimalizuje negativní dopady rozteklé pájecí pasty a vznik tzv. „náhrobků“ (jinak také „tombstoning“ nebo „manhattan effect“ – jedná se o nadzvedávání SMD na jednu pájecí plošku). Zároveň není vhodné zvolit příliš mírný nárůst, protože by způsobil nadměrnou oxidaci pájecí pasty. Dalším řešením je použít pájecí pastu s jiným typem rozpouštědla nebo tavidlo s nižší aktivační hodnotou, ovšem za cenu zkrácení doby skladovatelnosti. Posledním řešením je kontrolovat dávkování přesného množství pájecí pasty. Vzhledem k tomu, že první řešení minimalizuje výskyt dalších defektů a jedná se pouze o úpravu pájecího profilu, je jeho splnění nejsnadnější. Pro aplikaci v přetahovacích pecích s nucenou konvekcí by se měla teplota předehřívací zóny pohybovat do $170\text{ }^{\circ}\text{C} - 175\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Vyrovnávací zóna má úlohu vyrovnávání teplot mezi jednotlivými součástkami, které se v závislosti na svých rozměrech, materiálech a barvách nerovnoměrně zahřívají. Teplo ze zahřátějších míst se přenáší do chladnějších přímým spojením nebo vzdušným prouděním – teplota pece se zvyšuje pouze teplotním gradientem osazených DPS. V této fázi se začíná aktivovat tavidlo a rozpouští oxidy, vzniklé na povrchu součástek a pájených plochách DPS. Časová prodleva ve vyrovnávací zóně pájecí pece s nucenou konvekcí je 20 – 30 sekund.

V *přetavovací zóně* se pájecí pasta roztaví a stává se eutektickou při dosažení teploty liquida. Součástky se vlivem povrchového napětí eutektika a jeho soudržnými silami uspořádávají na pájené plochy a zaujímají pevné polohy. Nejvyšší teplota přetavení nesmí překročit maximální teplotu T_{max} , aby nedošlo k poškození pouzder součástek a jiných plastových součástí. Současně by teplotní rozdíl mezi teplotou liquida a maximální teplotou měl být co nejmenší. Pokud dojde k příliš blízkému přiblížení k maximální teplotě po delší dobu, je velká šance vzniku defektů, jako jsou prasklé spoje a trhliny na součástkách. Doba přetavení pro pájecí pec s nucenou konvekcí se pohybuje v intervalu 30 – 90 sekund.

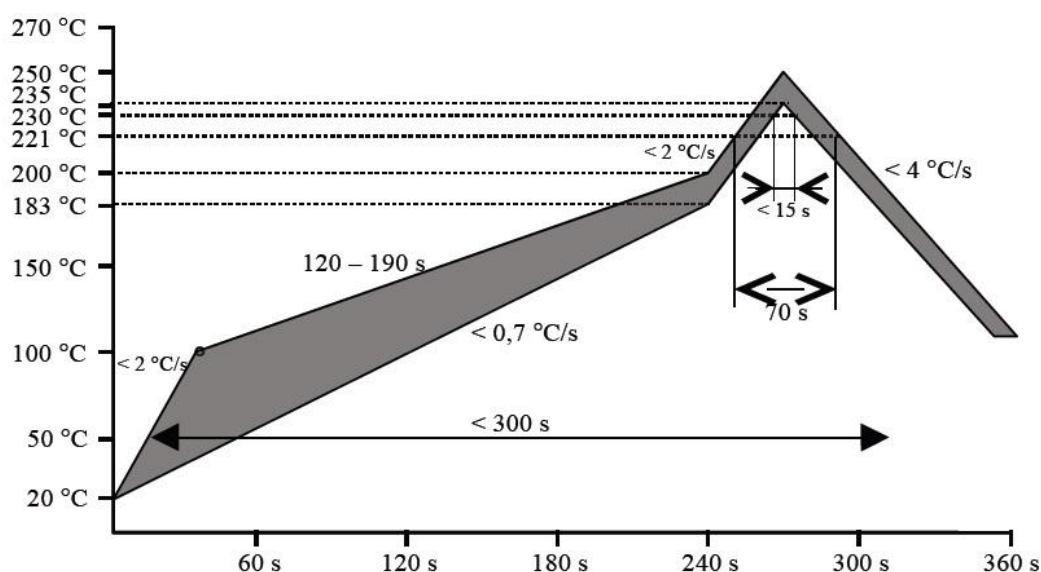
V poslední fázi dochází ke *chlazení*, které se nejčastěji provádí nucenou konvekcí vzduchu: buď spuštěným ventilátorem, nebo sadami odsávacích trysek. Rychlost chlazení by měla probíhat rychlostí minimálně $4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ do té doby, dokud teplota DPS neklesne na teplotu okolo $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Při nedodržení rychlosti může dojít ke zvětšení krystalů pájky a k nadměrnému růstu intermetalických sloučenin. Při správném chlazení má pájka jemnozrnnou strukturu a spoj je časově stálý s dlouhou životností.

2.7.2 Použití bezolovnatých pájecích past

Pro případ pájení bezolovnatými pájecími pastami je nutné dodržovat vyšší teploty přetavení, přičemž teplota tání bezolovnatých pájek se pohybuje okolo 225 °C – 235 °C. Tento teplotní nárůst vede ke snížení rozdílu mezi maximální teplotou a teplotou, vhodnou pro přetavení. Bezolovnaté pájení tedy klade vyšší nároky na přesnost pájecích pecí a regulaci teplot. Je také doporučeno setrvat v přetavovací fázi delší dobu kvůli sníženým eutektickým vlastnostem bezolovnatých pájecích past.

Pro pájecí profil je doporučeno používat profil typu RTS z (Obr. 10) s lineárním nárůstem. Tímto postupným ohřevem se minimalizují problémy se sníženou smáčivostí bezolovnatých pájecích past. Zároveň se tím snižují energetické náklady, zvyšuje účinnost a zlepšuje implementace zjednodušeného pájecí profilu v rámci regulace teploty.



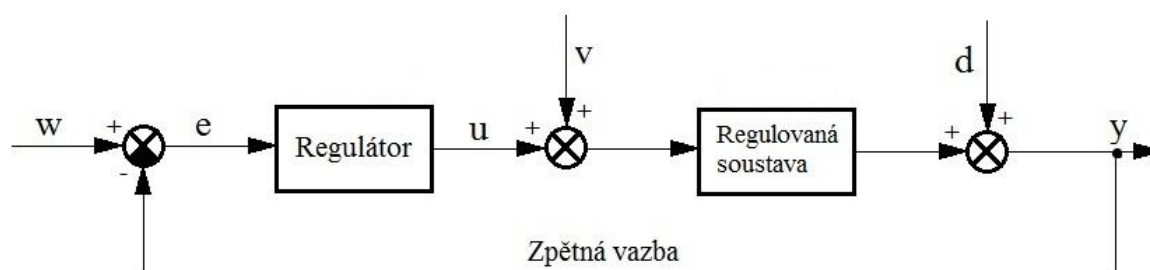
Obrázek 10 - Pájecí profil bezolovnaté pasty [11]

Uvedené pájecí profily v katalogových listech jednotlivých pájecích past ovšem nepředstavují ideální instrukce pro pájení přetavením. Teplotní gradienty jsou ovlivňovány rozmístěním součástek na DPS, jejich velikostí, barvou, použitými materiály, rozměrem DPS a dalšími vlastnostmi. Proto je třeba brát tyto katalogové údaje pouze jako doporučené a vlastními experimenty s nastavením pájecích profilů se dopracovávat ke kvalitněji zapájeným spojům s dlouhou životností.

3 Regulace tepelných soustav

3.1 Základní pojmy regulace

Regulace je schopnost udržet požadovaný stav *regulované veličiny* v určitých hodnotách vzhledem k nežádoucímu působení okolních vlivů. Je realizována *regulačním obvodem*, který řídí *regulovanou veličinu* podle její předem naprogramované změny nebo plní funkci sledování ručně prováděných změn. Hodnota, na kterou je regulovaná veličina nastavena, se jmenuje *žádaná hodnota*. Ideovou představu znázorňuje Obr. 11.



Obrázek 11 - Blokové schéma regulačního obvodu

Označení:

y – regulovaná veličina

u – akční veličina

v, d – poruchové veličiny

e – regulační odchylka

w – požadovaná (řídící) veličina

Regulační obvod se zde skládá ze dvou podsystemů: regulátoru a regulované soustavy. Regulovaná veličina y se udržuje na požadované hodnotě pomocí změn akční veličiny u . Její hodnotou je zástupná fyzikální veličina, snadno ovlivnitelná v daném procesu regulace, která musí být nastavitelná v rozsahu hodnot regulované veličiny.

Poruchové veličiny v, d tuto regulaci nepředvídatelně ovlivňují a lze je odstranit pomocí změn akční veličiny u . Účinek poruch působí nepřímo na průběh regulované veličiny y (poruchová veličina d) nebo se přidává jako složka k akční veličině u (poruchová veličina v).

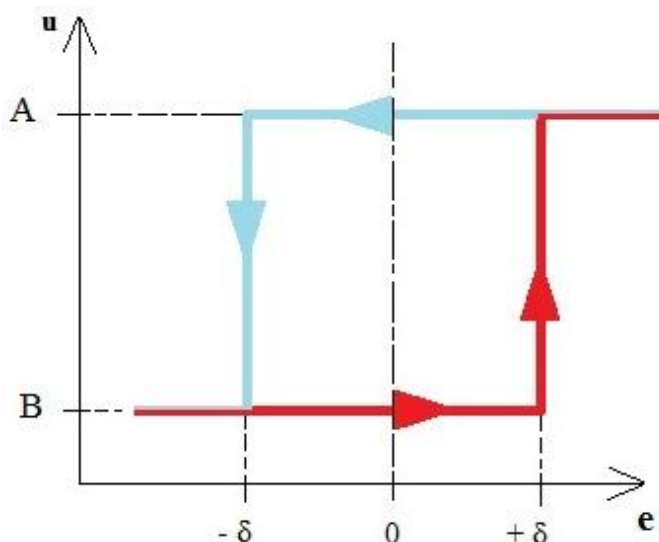
Výstupem regulátoru jsou změny akční veličiny u , které povedou k odstraňování regulační odchylky e , vytvořené rozdílem požadované (řídící) veličiny w a regulované veličiny y .

Platí: $e = w - y$. (3.1)

Regulátor v podstatě porovnává naměřenou hodnotu se žádanou. Odchylku e je poté nutné nějakým způsobem přeměnit na funkci času (integrací nebo derivováním), aby bylo možné získat regulační závislost. Mezi základní úkoly regulátoru tedy patří potlačení působení poruch a zároveň sledování požadovaných změn hodnot regulované veličiny.

3.2 Dvoupolohový regulátor

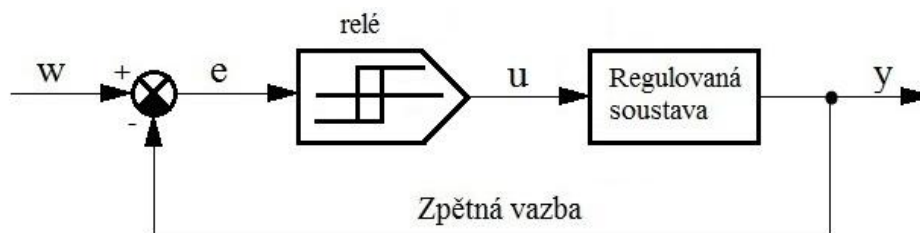
Jedná se o jeden ze základních typů nespojitých regulací. Cílem regulátoru je udržovat žádanou hodnotu regulované veličiny y na konstantní hodnotě. Akční veličina u je nespojitě nastavována regulátorem do jednoho ze dvou mezních stavů A , B (zapnuto – vypnuto) při změně regulační odchylky e , pokud se překročí nastavená hystereze δ – necitlivost na změnu regulované veličiny (Obr. 12).



Obrázek 12 - Princip dvoupolohové regulace s hysterezí

Prakticky si to lze lépe představit na příkladu ovládání klimatizované místnosti, kdy žádanou hodnotou je teplota v místnosti $t = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$ při hysterezi $\delta = \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Akční člen představují klimatizace/topné těleso, které jsou zapnuté pouze při zvýšení/poklesu teploty v místnosti o $2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Typický obvod pro dvoupolohovou regulaci je na (Obr. 13) na následující straně.



Obrázek 13 - Blokové schéma dvoupolohové regulace

Pokud by hystereze byla nastavená na příliš nízkou hodnotu, akční člen (v konkrétním příkladě např. relé) by kmital příliš rychle. Tyto rázy by se mohly přenášet do regulovaného systému a zatěžovat jej, v nejkrajnějším případě by mohlo dojít ke zničení relé.

Další obecné rozdělení dvoupolohových regulátorů je na regulátory *bez hystereze* (akční veličina je po překročení regulační výchylky nastavena trvale do jednoho mezního stavu, např. automatické vypnutí varné konvice) a *symetrické nebo nesymetrické* (symetrické mají mezní hodnoty umístěné ve stejných kladných a záporných hodnotách).

Dvoupolohové regulátory se používají nejčastěji pro nenáročné tepelné regulace, např. ohřev vody, regulace teploty v teráriích, signalizace teplot (var vody, bod mrazu) nebo jako náhrada mechanických termostatů.

- Výhody: jednoduchá konstrukce, vysoká spolehlivost, nízká cena.
- Nevýhody: nízká přesnost regulace.

3.3 PID regulátory

PID regulátory patří mezi regulátory s pevně danou strukturou. Kombinací jeho základních funkcí lze navrhnout regulátor, který bude vhodný pro regulaci úlohy určitého typu. Jeho podstatou je vyhodnocování akčního zásahu na základě regulační odchylky e a jejího integrálu nebo derivace.

Regulátor obsahuje 3 složky:

- proporcionální (P)
- integrační (I)
- derivační (D)

Jejich nastavení může být provedeno empiricky nebo matematicky (pomocí přenosu).

3.3.1 Proporcionální složka

Podílí se na zesílení záporné zpětné vazby, které je tím větší, čím je rychlejší regulační děj. Při příliš vysokých hodnotách by mohlo dojít ke ztrátě stability z důvodu kmitání (nárůstem do nekonečna). Statickým systémům proporcionální složka nezaručí dosažení žádané hodnoty (nenulové hodnotě výstupní veličiny odpovídá nenulová hodnota regulátoru a nenulová regulační odchylka) – se stoupajícím zesílením r regulační odchylka klesá.

Pro proporcionální složku platí vztah:

$$u_t = r_0 e(t) \quad (3.2)$$

V praxi se nastavitelný parametr proporcionální složky nazývá *pásmo proporcionality*:

$$\delta = \frac{1}{r} 100 [\%] \quad (3.3)$$

Zmenšením pásma proporcionality lze zvýšit zesílení a tím snížit trvalou regulační odchylku.

3.3.2 Integrovní složka

S touto složkou pro určitou změnu vstupní veličiny odpovídá změna rychlosti výstupní veličiny. Jako I – regulátor je nejvhodnější pro regulaci statických systémů s dopravním zpožděním, kde je možné dosáhnout nulové regulační odchylky v závislosti na snížení zesílení. Negativně se projevuje na prodloužení regulačního děje a zvýšení řádu. U soustav s astatismem může být tato složka vynechána (obsahuje totiž nulový pól).

Pro integrační složku platí vztah:

$$u_t = r_1 \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \quad (3.4)$$

V praxi se fyzikální hodnota integrační složky udává v sekundách (integrační čas).

3.3.3 Derivační složka

S touto složkou pro určitou změnu regulační odchylky vstupní veličiny odpovídá určitá výstupní veličina. Slouží k urychlení regulace, která je nejčastěji využita u soustav vyšších řádů. Její implementace umožní zpětné vazbě reagovat s určitým předstihem. Neuplatní se v ustáleném stavu.

Pro derivační složku platí vztah:

$$u_t = r_2 T_D \dot{e}(t) \quad (3.5)$$

V praxi se fyzikální hodnota derivační složky udává v sekundách (derivační čas) [12].

3.3.4 Vztahy pro PID regulátor a jejich aplikace

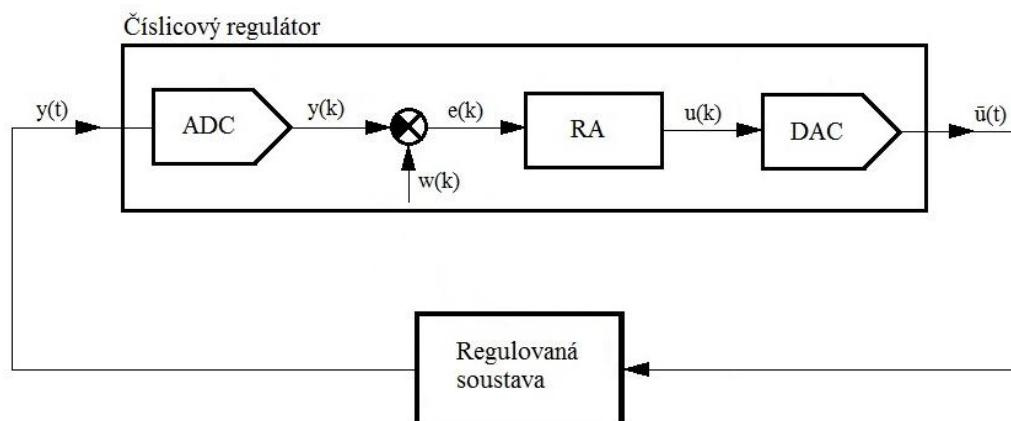
Z kombinací výše uvedených tří složek dynamického chování systémů lze odvodit více variant PID regulátoru: P – regulátor, PD – regulátor, PI – regulátor, I – regulátor (varianta se samotným D – regulátorem nemá smysl, protože nerealizuje zpětnou vazbu).

V případě praktické realizace má PID regulátor zjednodušený tvar, vyplývající ze vztahů (3.2), (3.4) a (3.5):

$$u_t = r \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \dot{e}(t) \right] \quad (3.6)$$

Pro přenos platí: $R(s) = r \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right)$ (3.7)

Pro případnou technickou realizaci řízení PID regulátoru počítačem by bylo nutné schéma z Obr. 11 pozměnit do podoby Obr. 14.



Obrázek 14 - Číslicová regulační soustava

Číslicový regulátor se skládá z A/D převodníku, regulačního algoritmu (programu) a D/A převodníku.

A/D převodník snímá v pravidelných periodických intervalech Δ naměřené hodnoty vstupní veličiny a předává je k dalšímu zpracování pomocí regulačního algoritmu. Ten vytvoří regulační odchylku podle regulační funkce, na kterou je naprogramován. Výsledkem jsou číselné hodnoty akční veličiny, které se od skutečných hodnot vstupní veličiny liší způsobeným akčním zásahem. Číselná informace je dána ke zpracování D/A převodníku, ten ji převede na analogový signál a přivede ji na vstup regulované soustavy. V idealizovaném případě je časový interval snímání a vzorkování vstupní a výstupní veličiny zanedbatelný.

Ve vztahu (3.6) pro číslicový PID regulátor je možné přibližně nahradit derivaci s integrací za diferenci se sumací a za čas t dosadit diskrétní krok $k = 0, 1, 2 \dots$

Potom platí:

$$u(k) = r \left[e(k) + \frac{\Delta}{T_I} \sum_{j=1}^k e(j) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta} \right] \quad (3.8)$$

Pro praktickou realizaci regulátoru tento vztah není vhodný, protože s každým krokem k se stává sumace integrační složky náročnější operací.

Zavedením pomocné proměnné, která se aktualizuje v každém kroku, se tento problém odstraní:

$$u(k) = r \left[e(k) + \frac{\Delta}{T_I} S(k) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta} \right] \quad (3.8)$$

$$S(k) = S(k-1) + e(k); S(0) = 0$$

3.3.5 Nastavení PID regulátorů podle zkušenosti

Každý správně navržený regulační obvod by měl splňovat určitou přesnost regulace, dostatečnou rezervu ve stabilitě a účinnost regulace. Lze rozlišit více přístupů k nastavení PID regulátorů, které je možné rozdělit do dvou kategorií – pokud vyžadujeme nebo nevyžadujeme znalost přenosu. Vzhledem k tomu, že první kategorie zahrnuje výpočty pomocí složitějších matematických metod, více informací je v (Bohumil Šulc, 2004). Druhá kategorie obsahuje metody nastavení bez znalosti přenosu.

Jednou z metod je *na základě zkušenosti*.

Při tomto nastavení se využije doporučených hodnot, které se poté upravují tak, aby v dalším experimentu došlo k viditelné změně v regulaci (s tím, že uživatel už má nějakou zkušenost s regulací tepelných soustav). Pro regulaci teploty to jsou hodnoty: $\delta = 5\% - 50\%$, $T_I = 1\text{ s} - 20\text{ s}$, $T_D = 0,1\text{ s} - 3\text{ s}$ [14].

Doplňující informace k dalším metodám, jako např. *Ziegler-Nicholse pro kritické zesílení* nebo *pomocí přechodové charakteristiky*, lze najít v (Bohumil Šulc, 2004).

3.3.6 PID – regulátory v praxi

V praxi se PID regulátory používají k regulaci teploty pecí a tam, kde je vyžadovaná vyšší přesnost regulace (ve fyzikálních jednotkách desetiný až cca 3°C). V případě ideálně nastaveného PID regulátoru nikdy nenastane překmit přes žádanou hodnotu vlivem tepelné setrvačnosti.

- Výhody: přesnější regulace.
- Nevýhody: složitější nastavení.

4 Měření teploty v řádu 0 °C – 400 °C

4.1 Základní pojmy

Teplota je fyzikální veličina – forma energie, související s pohybem částic. Na rozdíl od teploty není stavovou veličinou, protože nezávisí na stavu soustavy v přítomnosti, ale je závislá na minulosti dané soustavy.

Teplota je stavová veličina, která vyjadřuje stav termodynamické rovnováhy, tzn., že musí být stejná pro všechny části izolované soustavy, ve které neprobíhají žádné změny. Nedá se měřit přímo, ale prostřednictvím jiných fyzikálních veličin, proto je měření teploty nepřímým měřením.

K číselnému vyjádření teploty se v termodynamické stupnici používá jednotka *Kelvin*. Jedná se o základní jednotku SI. Je definována na základě účinnosti vratného Carnotova cyklu pro izolovanou soustavu lázní, nezávislých na použité látce.

Pro $T_2 > T_1$ platí:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} [-], \quad (4.1)$$

kde:

η – účinnost cyklu,

T – termodynamická teplota,

Q_2 – odebrané teplo teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_2 ,

Q_1 – odebrané teplo teploměrovou látkou do lázně s teplotou T_1 .

Ze vztahu (4.1) vyplývá (4.2).

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (4.2)$$

Pokud teploměrnou látku nahradíme plynem, můžeme jej popsat stavovou rovnicí.

$$pV = R_m T, \quad (4.3)$$

kde R_m je molární plynová konstanta ($R_m = 8,3145 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) a V je objem plynu.

Pro konstantní objem vyplývá ze vztahu (4.3) rovnice pro plynový teploměr

$$T = T_0 \frac{p}{p_0} [K], \quad (4.4)$$

kde $p_0 = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ a $T_0 = 273,15 \text{ K}$.

Kelvin byl definován jako bod trojného bodu vody (rovnovážného stavu tří skupenství) s přiřazenou hodnotou $T = 273,16 \text{ K}$, tedy jeden kelvin je 273,16. díl termodynamické teploty trojného bodu vody.

Od Kelvinovy termodynamické stupnice byla dovozena *Celsiova (teplotní) stupnice*. Vznikla posunutím o teplotu 273,15 K (o 0,01 K nižší než termodynamická teplota trojného bodu varu). Její jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). Pro Celsiovu teplotu t a termodynamickou teplotu T platí:

$$t (^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K} \quad (4.5)$$

a pro teplotní rozdíl platí:

$$\Delta t = \Delta T.$$

4.1.1 Senzory teploty a jejich rozdělení

Pro stanovení teploty se používají závislosti jiných fyzikálních veličin, u kterých lze vyjádřit matematickou závislost na stupnici. První teploměry byly závislé na atmosférickém tlaku, velmi rozměrné a málo přesné. S rozvojem technologií a nástupem mikroelektroniky došlo ke zmenšování rozměrů a zvyšování přesnosti. Díky tomu mohou být snímače teploty miniaturizovány do podoby integrovaných polovodičových součástek, které obsahují čidlo teploty spolu se zařízením na zpracování vyhodnocených veličin.

Senzory teploty lze rozdělit podle principu:

- polovodičové s PN přechodem,
- odporové,
- termoelektrické, dilatační, radiační, optické, chemické, magnetické a další, např. kapacitní.

Podle styku s měřeným prostředím:

- dotykové,
- bezdotykové.

Podle přeměny signálu:

- aktivní (chovají se jako zdroje elektrické energie),
- pasivní (chovají se jako spotřebiče elektrické energie, kterou využijí pro transformaci teploty na jinou fyzikální veličinu).

4.1.2 Statická charakteristika

Funkční závislost $Y = f(X)$ mezi měřenou veličinou X (např. teplotou) a transformovanou veličinou Y v časově ustáleném stavu se nazývá *statická charakteristika*. Lze ji popsat polynomem:

$$Y = f(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n. \quad (4.6)$$

Ideální charakteristika má tvar

$$Y = KX, \quad (4.7)$$

kde K je citlivost senzoru a také konstanta přenosu. Bohužel není prakticky realizovatelná.

S citlivostí senzoru souvisí *práh citlivosti*, který je pro vstupní napěťový signál daný směrodatnou odchylkou šumového napětí u_s ve tvaru

$$u_t = \sqrt{\overline{u_s}} [V] \quad (4.8)$$

Mezi další statické vlastnosti patří *dynamický rozsah*. Je to interval hodnot snímané veličiny, ohraničený prahem citlivosti a maximální hodnotou měřené veličiny.

4.1.3 Nejistota měření a senzorů

Jedná se o vlastnost, popisující přesnost měření prostřednictvím relativních chyb senzorů a absolutních a relativních chyb měření. *Absolutní chyba měření* je poté definována jako rozdíl ΔX mezi výsledkem měření a pravou hodnotou X_S měřené veličiny. *Relativní chybu měření* vyjadřuje podíl absolutní chyby měření ΔX a měřícího rozsahu měřené veličiny.

Chyby je možné rozdělit:

- systematické (vznikají např. v měřícím řetězci a jsou částečně odstranitelné),
- náhodné (časově nahodilé),
- hrubé (způsobené závadou v měřícím řetězci nebo nevhodnou obsluhou).

Nejistotu měření je možné definovat jako parametr, přiřazený k výsledkům měření, který charakterizuje odůvodněný (pomocí pravděpodobnosti nebo racionálního myšlení) rozptyl hodnot. Dělení podle dalších kritérií je uvedeno v (Kreidl, 2005).

Nepřímá měření, mezi která patří měření teplot, jsou měření funkčně závislé podle vztahu:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_m), \quad (4.9)$$

kde

- X – přímo měřená veličina,
- Y – měřená veličina.

Protože pravé hodnoty přímo měřených veličin X ani hodnoty výstupní funkce Y nejsou známé, je nutné vztah (4.9) přepsat do podoby (5.0).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (5.0)$$

přičemž hodnoty x je nutné odhadnout v určitém intervalu.

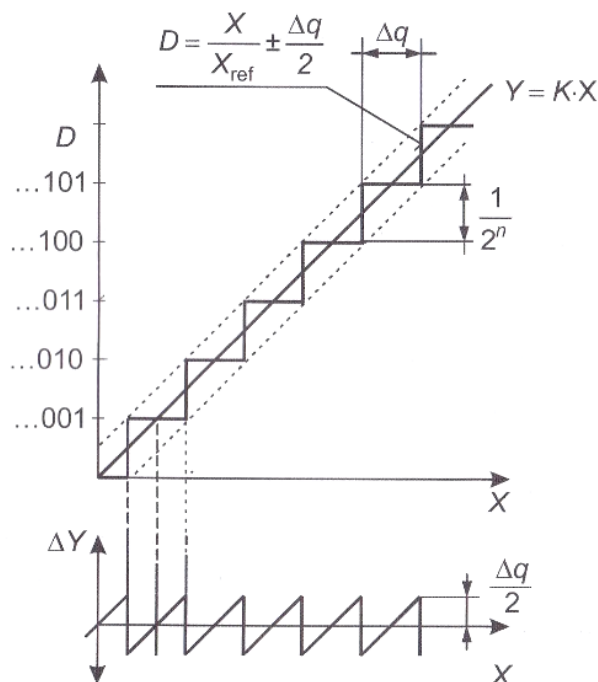
Relativní přesnost senzoru je dána vztahem

$$\delta_S = \frac{X_M - X_S}{X_{max} - X_{min}} = \frac{(\Delta X)_{max}}{X_{max} - X_{min}} [-], \quad (5.1)$$

kde

- X_M – maximální hodnota,
- X_S – skutečná hodnota,
- $X_{max} - X_{min}$ – měřící rozsah.

Další nejistoty mohou být způsobeny hysterezí charakteristiky nebo kvantováním signálu (při zpracování signálu A/D převodníkem – Obr. 15).



Obrázek 15 - Převodní charakteristika A/D převodníku [15]

4.1.4 Dynamické vlastnosti a přechodová charakteristika

Vzhledem k tomu, že měřená teplota se neustále mění s časem, je nutné s touto vlastností počítat u měřicích a regulačních systémů – s požadavkem minimálního zkreslení výstupního signálu.

Dynamické chování senzoru lze popsat lineární diferenciální rovnicí s konstantními koeficienty:

$$a_n Y^{(n)} + \dots + a_2 \ddot{Y} + a_1 \dot{Y} + a_0 Y = X, \quad (5.2)$$

kde X je měřená veličina teplota.

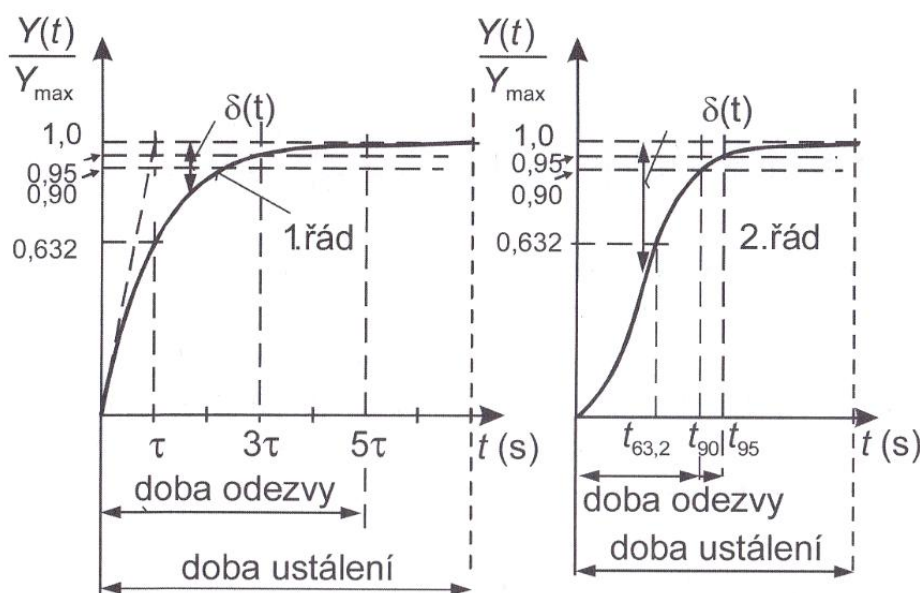
Dynamické vlastnosti senzorů lze popsat rovnicemi prvního, druhého a výjimečně vyššího řádu. Pro grafické znázornění slouží *přechodová charakteristika* a to jak odezvou na jednotkový skok, tak odezvou na změnu teploty. Obě charakteristiky jsou vždy aperiodické nebo na mezi aperiodicity z důvodu nesetřvačné hmotnosti senzorů.

Charakteristiku 1. řádu lze odvodit z rovnice:

$$\frac{Y(t)}{Y_{\max}} = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (5.3)$$

kde t je čas v sekundách a τ je časová konstanta, za který odezva na skokovou změnu dosáhne 63,2 % ustálené hodnoty.

Grafické znázornění charakteristik 1. a 2. řádu je na (Obr. 16).



Obrázek 16 - Přechodová charakteristika 1. a 2. řádu [15]

Přechodové charakteristiky 2. a 3. řádu (které odpovídají většině teplotních senzorů) lze aproximovat charakteristikou 1. řádu nebo 1. řádu s dopravním zpožděním.

Důležitým údajem v praxi, udávaným výrobcí, je časová konstanta τ nebo tzv. doba odezvy (doba, za kterou odezva dosáhne 90 % nebo 95% ustálené hodnoty).

Pro charakteristiku 1. řádu s dynamickou od ustálené hodnoty platí vztah:

$$\delta(t) = \frac{Y(t) - Y_{max}}{Y_{max}} = \frac{Y(t)}{Y_{max}} - 1. \quad (5.4)$$

4.2 Polovodičové senzory teploty s PN přechodem

4.2.1 Diodové PN senzory teploty

Pro měření teploty se využívá teplotní závislosti proudu na diodě, který prochází přechodem.

Ze Shockleyho rovnice:

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1 \right) [A], \quad (5.5)$$

vyplývá vztah:

$$U_D = m \cdot U_T \cdot \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right) [V] \quad (5.6)$$

$$U_T = \frac{kT}{e} [V],$$

kde

I_D - saturační proud PN přechodu diody v propustném směru,

I_S - saturační proud PN přechodu diody v závěrném směru,

U_D - napětí na PN přechodu diody v propustném směru,

U_T - teplotní napětí ($J \cdot C^{-1}$),

m - rekombinační koeficient polovodiče ($1 \leq m \leq 2$),

k - Boltzmannova konstanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$)

T - termodynamická teplota (K)

e - elementární náboj.

V rovnici (5.6) jsou veličiny m , U_T , I_S teplotně závislé. Proud I_S je funkcí termodynamické teploty a proto napětí U_D s rostoucí teplotou klesá. Pro tuto závislost lze odvodit vztah

$$\left(\frac{\partial U_D}{\partial T} \right)_{I_D} = m \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_D}{I_{S0}} \right) - \left(\frac{U_{g0}}{T_0} \right), \quad (5.7)$$

kde

I_{s0} – odpovídající saturační proud,

U_{g0} – napětí zakázaného pásu polovodiče pro teplotu 0 K,

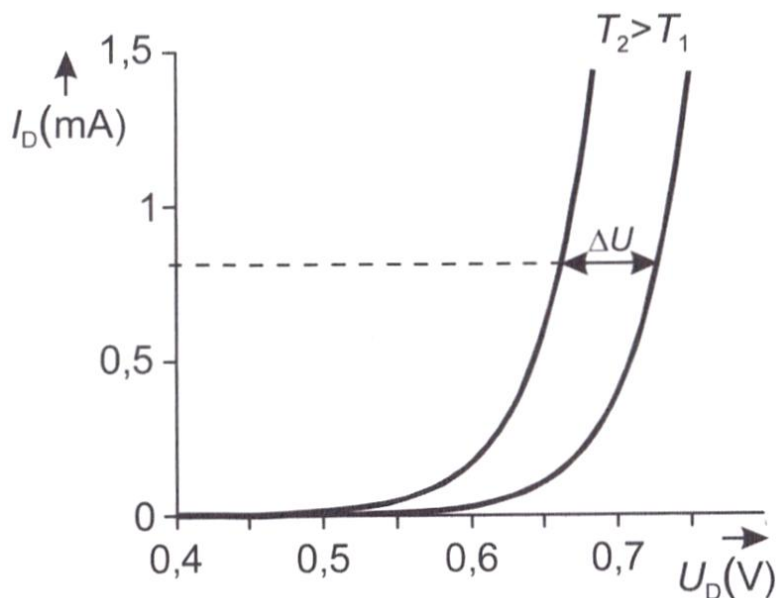
T_0 – vztažná teplota.

V případě těchto parametrů, platných pro křemíkovou diodu, je při vztažné teplotě $T_0 = 298$ K poměr změny napětí ke změně termodynamické teploty:

$$\partial U_D / \partial T = -(2,0 \text{ až } 2,5) \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}. \quad (5.8)$$

V praxi lze použít i jinou diodu, pouze se změní závislost na teplotě.

Zobrazení teplotní závislosti je na (Obr. 17).



Obrázek 17 - Teplotní závislost charakteristiky PN přechodu Si diody [15]

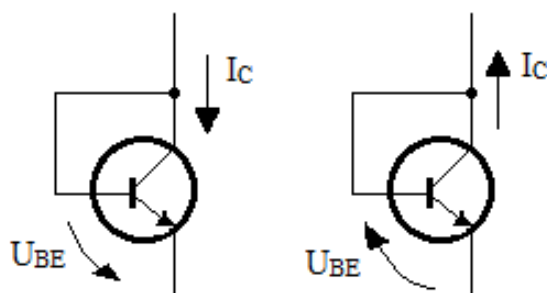
Tento typ senzorů má teplotní rozsah v intervalu od -55 °C do $+150$ °C při nejistotě měření 0,6 % až 2 %, takže ho **nelze použít** pro snímání teploty v pájecí peci. Protože se jedná o pasivní senzor, je třeba v případě dalšího zpracování (převodu z nepřímé veličiny na přímou) toto napětí mnohonásobně přesně zesílit, což není tak výhodné z důvodu závislosti proudu na teplotě, navíc charakteristika není čistě lineární.

- Výhody: nízká cena.
- Nevýhody: nelineární charakteristika, závislost proudu senzorem na teplotě.

4.2.2 Tranzistorové PN senzory teploty

Tyto senzory pracují na podobném principu jako diodové PN senzory tím způsobem, že využívají teplotní závislosti přechodu báze-emitor v propustném směru.

Pro jejich správnou funkci se využívá chování PN přechodu tranzistoru v zapojení podle Obr. 18.



Obrázek 18 - Tranzistorová dioda

Pro změnu proudu I_C o 0,01 % odpovídá změna citlivosti o $0,86 \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$.

Přechod U_{BE} je sice méně teplotně závislý na saturačním proudu než v případě použití diody, ale každý tranzistor má jiné parametry, dané výrobními nepřesnostmi, tudíž je třeba každý senzor navrhovat individuálně. Teplotní rozsah tranzistorové diody je opět v intervalu $-55\text{ }^\circ\text{C}$ do $150\text{ }^\circ\text{C}$, takže ji **není možné použít** ke snímání teploty v pájecí peci.

- Výhody: menší teplotní závislost.
- Nevýhody: nezaměnitelnost tranzistoru z důvodu výrobních nepřesností.

4.3 Kovové odporové senzory teploty

Jejich principem je teplotní závislost odporu kovu – souboru kladných iontů, které jsou rozmístěné v krystalové mřížce – a souborem neuspořádaně se pohybujících elektronů, které tvoří tzv. elektronový plyn.

Pro měrnou elektrickou vodivost platí vztah:

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m} [\text{S} \cdot \text{m}^{-1}], \quad (5.9)$$

kde

- n – počet elektronů v jednotkovém objemu,
- e – elementární náboj,
- τ – relaxační čas elektronů,

m – efektivní hmotnost nosiče náboje,
 σ – měrná elektrická vodivost (konduktivita).

Konstantou v kovech, která určuje závislost teploty na odporu, je teplotní součinitel odporu α , pro který lze napsat rovnici:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial t} = \frac{\partial(\ln R)}{\partial t} = -\frac{\partial(\ln \sigma)}{\partial t} = \frac{\partial(\ln m)}{\partial t} - \frac{\partial(\ln \tau)}{\partial t} - \frac{\partial(\ln n)}{\partial t} \quad [\text{K}^{-1}]. \quad (6.0)$$

Pro malý rozsah teplot (0 °C – 100 °C) lze s určitou nejistotou použít lineární vztah:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad [\Omega], \quad (6.1)$$

R_0 je odpor čidla při teplotě 0 °C.

Z této skutečnosti je možné stanovit střední hodnotu teplotního součinitele odporu α

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 R_0} \quad [-], \quad (6.2)$$

kde R_{100} je odpor senzoru při teplotě 100 °C.

Vzájemným porovnáním odporů senzoru při teplotě 0 °C a 100 °C je dán vztah

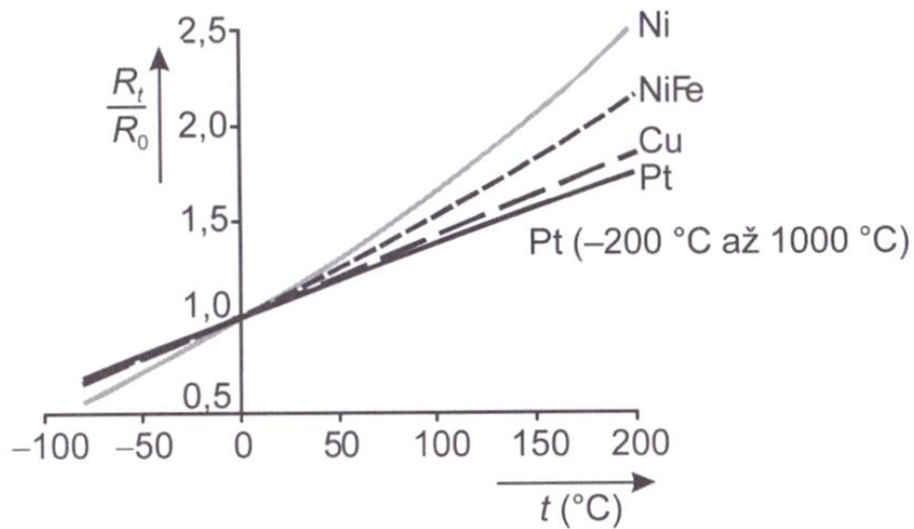
$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \quad [-], \quad (6.3)$$

který nelze používat v případě většího rozsahu teplot (viz dále).

Přehled materiálů, používaných jako odporových senzorů teploty, je uveden v (Tab. 4) a jejich charakteristiky na (Obr. 19) na následující straně.

Materiál	$\alpha \cdot 10^2 \quad [\text{K}^{-1}]$	Teplotní rozsah [°C]	Poměr odporů W_{100}
Platina	0,385 až 0,391	-20 až 850	1,385
Nikl	0,617 až 0,675	-70 až +150 (+200)	1,618
Ni-Fe	0,518 až 0,527	-100 až +200	1,426
Měď	0,426 až 0,433	-50 až +150	1,426

Tabulka 4 - Použité materiály pro kovové snímače teploty [15]



Obrázek 19 - Závislost odporových snímačů na teplotě [15]

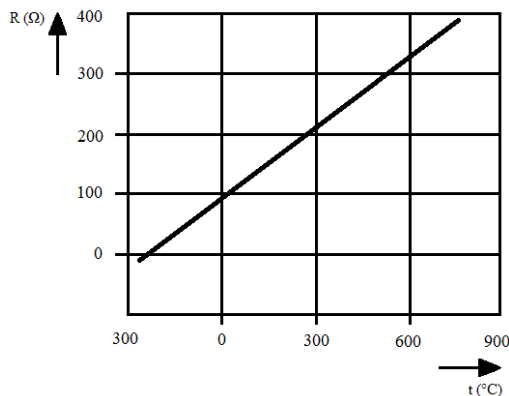
Z výše uvedených teplotních odporových snímačů se nejčastěji používají platinové snímače.

4.3.1 Platinové odporové snímače teploty

Jedním z důvodů častějšího výběru jsou vlastnosti platiny, mezi které patří chemická netečnost, vysoký bod tání a časová stálost. Vyrábějí se s vysokými nároky na čistotu platiny (99,999 %) ve dvou tolerančních třídách: třída A odpovídá interval teplot od -200 °C do 650 °C a třída B od -200 °C do 850 °C.

Technologie výroby spočívá v navinutí tenkého platinového drátku (od 0,007 mm do 0,005 mm) na keramické tělísko s pomocí drážek nebo zatavením do skla. Je také možné vytvořit platinovou vrstvu jejím napařením nebo iontovým leptáním na podložce z korundové keramiky – podle tloušťky platiny se tyto technologie označují jako tenkovrstvé nebo tlustovrstvé.

Díky lineární závislosti jeho odporu na teplotě (Obr. 20) je v praxi snadno aplikovatelným senzorem.



Obrázek 20 - Závislost odporu platinového čidla Pt 100 na teplotě

Platinových senzorů existuje více variant s rozdílným odporem o hodnotách 50, 100, 200, 500, 1000 nebo 2000 Ω , udávaným při 0 °C.

Pro měřicí rozsah teplot od 0 °C do 850 °C platí vztah:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) [\Omega], \quad (6.4)$$

kde

$$R_0 = 100 \Omega,$$

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}.$$

Vzhledem k jeho teplotní závislosti proudu I (v běžných hodnotách od 0,3 mA do 1 mA), který prochází měřeným platinovým senzorem, je daný vztah pro elektrický ztrátový výkon:

$$P = R_t I^2 [W], \quad (6.5)$$

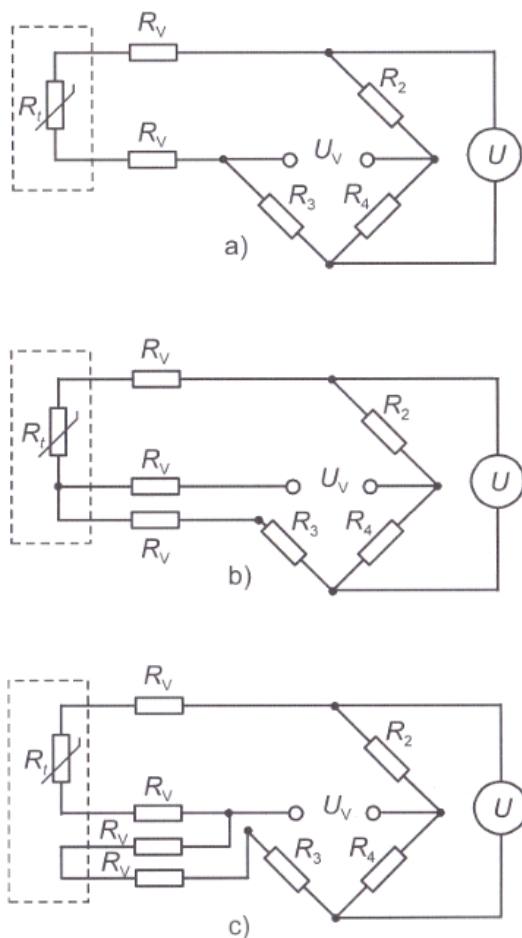
přičemž takto zahříváný snímač indikuje vyšší teplotu, než jaká je měřená hodnota.

K dalšímu ovlivnění dochází z důvodu umístění senzoru v určité vzdálenosti od měřícího obvodu, který je připojený vodičem s nenulovým odporem. Pokud lze uvažovat, že tento vodič z mědi není vystaven vyššímu teplotnímu rozpětí, platí lineární vztah:

$$R_{Cu} = R_{Cu0}(1 + \alpha_{Cu} t_v) [\Omega], \quad (6.6)$$

kde $\alpha_{Cu} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ označuje teplotní součinitel odporu a t_v teplotu vedení.

Jedny z těchto obvodů pro vyhodnocení odporových snímačů teploty jsou Wheatstoneovy můstky z Obr. 21,



Obrázek 21 - Wheatstoneovy můstky [15]

přičemž u vyváženého můstku z varianty a) je možné dosáhnout největší citlivosti splněním podmínky:

$$\begin{aligned} R_3 &= R_2 = R, \\ R_4 &= R_{tz} + 2R_{Cu0}, \end{aligned} \quad (6.7)$$

kde R_{tz} označuje základní hodnotu měřícího odporu pro počátek měřícího rozsahu.

Pro výstupní napětí vyváženého můstku pak platí výsledný vztah:

$$U_V = U \frac{\Delta R_t + 2\Delta R_{Cu}(R_{Cu0} + 2\Delta R_{Cu})}{\Delta R_t + 2\Delta R_{Cu} + R + R_1 \left(\frac{\Delta R_t}{R} + \frac{R_1}{R} + 2 \right)} [V]. \quad (6.8)$$

Dalším zapojením z (Obr. 21 – varianta b) je třívodičový můstek, který je výhodný pro zmenšení teplotní závislosti odporu vedení z důvodu současné změny odporu ve dvou větvích.

Toto zapojení se také používá pro měření s platinovými senzory o vyšší hodnotě odporu s proudovým napájením. Další zapojení je možné nalézt v (Kreidl, 2005).

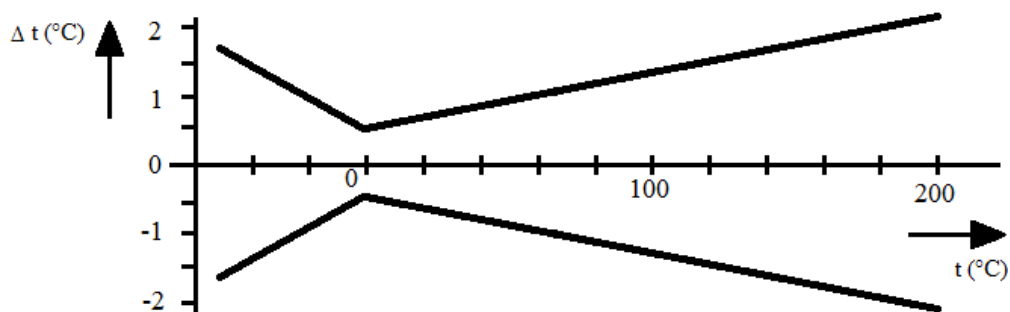
Z výše uvedených vlastností vyplývá, že **je možné tento snímač použít** pro snímání teploty v pájecích pecích.

Shrnutí platinových snímačů teploty:

- Výhody: velký teplotní rozsah, chemická, tepelná a časová stálost, lineární charakteristika.
- Nevýhody: menší citlivost, nelinearita pro přesná měření v intervalu od 0 °C do 100 °C.

4.3.2 Niklové odporové snímače teploty

Dalším používaným materiálem pro teplotně závislé odporové senzory je nikl. Niklové snímače kompenzují nevýhody platinových snímačů – jejich reakční doba je velmi rychlá a tolerance velmi malá (Obr. 22), ovšem za cenu zmenšeného teplotního rozsahu a odolnosti vůči agresivnímu prostředí.



Obrázek 22 - Tolerance niklových snímačů

4.4 Termoelektrické články

Termoelektrické články (zkráceně termočlánky) využívají Seebeckova jevu – přímého převodu tepelné energie na elektrickou. V teplejší části vodiče mají totiž nositelé náboje větší energii, a proto přecházejí ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších.

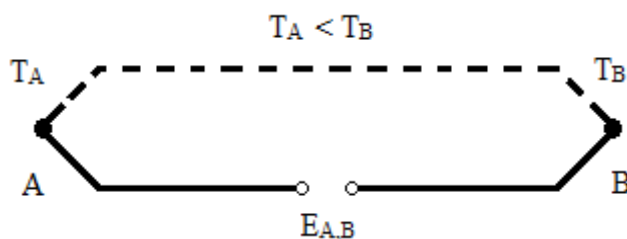
Lze definovat absolutní Seebeckův koeficient:

$$S(t) = \lim_{\Delta T \rightarrow \infty} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{dE}{dT} \rightarrow dE = S(t)dT, \quad (6.9)$$

ze kterého vyplývá existence elektromotorického napětí ΔE při rozdílných teplotách konců vodičů ΔT .

Termočlánek se tedy skládá ze dvou vodičů (příp. polovodičů) z různého materiálu, kterými protéká elektrický proud jen tehdy, když mají oba spoje A, B různou teplotu. V případě rozpojení elektrického obvodu lze podle Seebeckových vztahů (7.0) v místě svorek (Obr. 23) naměřit elektrické napětí.

$$dE_{A,B} = S_{A,B}dT, E_{A,B} = \int_{T_A}^{T_B} S_{A,B}dT \quad (7.0)$$



Obrázek 23 - Termoelektrické napětí

V praxi se Seebeckovy koeficienty označují jako symboly α – termoelektrické koeficienty. Pro malý teplotní rozdíl míst A, B odpovídá vztah:

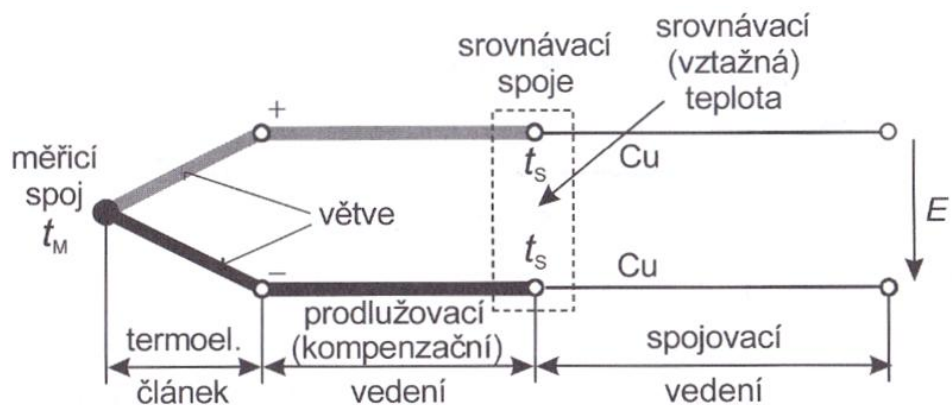
$$E = \alpha_A(t_A - t_B) = \alpha_B(t_A - t_B) = (\alpha_A - \alpha_B)(t_A - t_B) = \alpha(t_A - t_B) [V] \quad (7.1)$$

Hodnoty termoelektrického koeficientu se u vodičů pohybují v řádu jednotek až desítek mikrovoltů na stupeň Celsia (Kelvina), pro polovodiče stovky mikrovoltů (kvůli větší hustotě nositelů náboje). Vzhledem k tomu, že nárůst termoelektrického napětí nevykazuje výraznou nelinearitu v závislosti na teplotě, lze tyto hodnoty snadno převést na měřenou teplotu.

Jednotlivé typy termočlánků se označují písmeny K, T, J, N, E, R, S, B, G, C. Pro všechny tyto typy platí rozsah pro měření teplot od $-185\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+2320\text{ }^{\circ}\text{C}$, i když jednotlivé typy se od sebe liší složením a rozsahem teplot použití. Např. termočlánek typu K, který se skládá ze slitiny chromniklu a hliníku s niklem, je určen k použití v teplotním rozsahu od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Termočlánky **je možné použít** k měření teploty v pájecích pecích (často se vyskytují v průmyslových aplikacích).

- Výhody: velký teplotní rozsah, lineárnost charakteristik.
- Nevýhody: nutnost kompenzace vlivu kolísání srovnávacích teplot v měřicím řetězci (Obr. 24), viz (Kreidl, 2005).

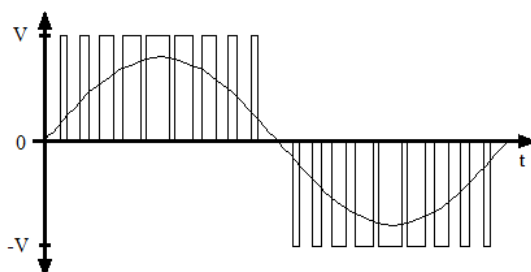


Obrázek 24 - Měřicí řetězec termočlánku [15]

5 Řízení výkonu pájecí pece

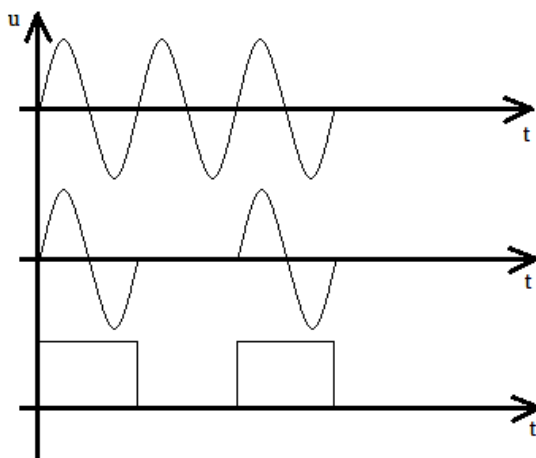
Jedna z možností je dosažení změny výkonu pece pomocí změny napájecího napětí. Vzhledem k tomu, že pec je připojená na síťové napětí, je nutné zamezit šíření rušení, které by mohlo vzniknout v samotném přepínání spínacím prvkem (rychlost změny pulzu). Toto rušení by mohlo omezit funkčnost pece nebo i další připojená elektrická zařízení.

Známým principem, využívaným k regulaci, je *pulzně – šířková modulace*. Využívá se v ní převodu analogové veličiny na diskretní signál, kde aktuální hodnotu napětí představuje poměr (střída) logických hodnot jedniček a nul (Obr. 25). Tato metoda je ale **nevhodná**, protože při spínání pulzů určité frekvence může dojít ke vzniku rušení.



Obrázek 25 - Pulzně šířková modulace

Daleko vhodnější je lineární metoda *spínání pomocí tyristoru*. Jedná se o polovodičovou součástku s přechodem PNPN, kterou lze přepnout do sepnutého/ blokovacího stavu právě tehdy, když jí prochází nulové sinusové napětí i proud (Obr. 26). Tímto spínáním je možné nepřímou regulovat výkon a zároveň omezit vznik nežádoucího rušení pouze na dobu sepnutí.



Obrázek 26 - Regulace napětí tyristorem

6 Praktická část

V této části bakalářské práce se budu zabývat návrhem regulátoru teploty pájecí pece podle pájecího profilu, daným pájecí pastou, s použitím mikroprocesoru. Tyristorový regulátor v podobě polovodičového relé bude pracovat ve zpětné vazbě s informací o aktuální teplotě, naměřené senzorem, která bude spolu s informací o pájecím profilu zobrazena pomocí LCD displeje. V mikroprocesoru budou uložena data pájecích profilů spolu s funkcí držení konstantní teploty a možností zrušením prováděné operace.

6.1 Senzor a jeho převodník

Při výběru senzoru je nutné zohlednit jednotlivé vlastnosti, na které je kladen důraz při měření teploty v rozsahu pájení přetavením. Rozhodl jsem se vybrat jako senzor *platinový rezistor*, který je svou přesností, materiálovou stálostí a dalšími teoretickými předpoklady vyhovující. Navíc se svou téměř lineární charakteristikou bude vhodnější pro převod.

Pro vyhodnocení odporu platinového snímače je nutné využít převodník. Ty lze rozdělit podle dvou principů měření:

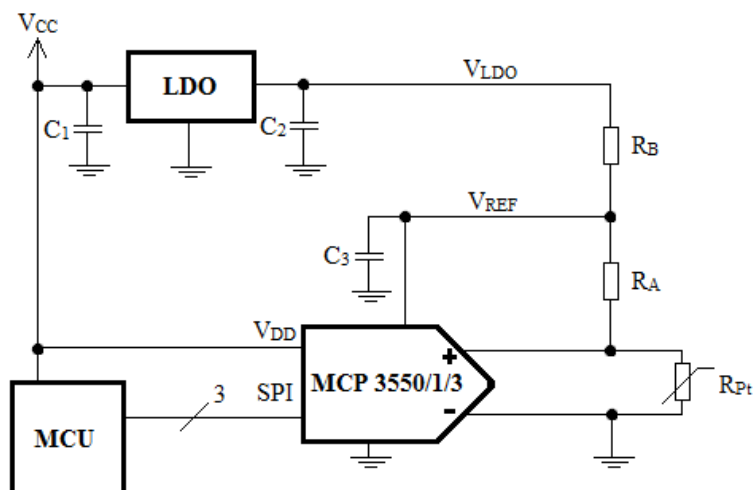
- měření napětí – použitím Wheatstoneova můstku s kompenzací vlivu odporu přívodů,
- měření proudu – napájením platinového senzoru proudovým zdrojem a měřením úbytku napětí na zátěži (rezistoru).

Rozhodl jsem se použít *A/D převodník MCP3550/1/3* od firmy Mikrochip spolu se zapojením pro přesná měření teplot [16], který disponuje:

- převodníkem typu Delta-Sigma s 22bitovým rozlišením (dostatečným pro dosažení přesnosti přechodových teplot pájecích profilů),
- nízkými hodnotami výstupního šumu (2,5 μV efektivní naměřené hodnoty),
- nízkým odběrem proudu při převodu (100 μA až 120 μA podle napájení),
- napájecím napětím v rozsahu 2,7 V do 5,5 V,
- výstupy se sériovým rozhraním (SPI).

Spojení platinového rezistoru s převodníkem bude přímé, zdroj napětí s nízkým úbytkem (LDO) bude sloužit jako reference (Obr. 27 na následující straně). Teplotní odchylka pak nebude závislá na přesném nastavení referenčního napětí, protože tato hodnota napětí se bude měnit spolu s odporem platinového rezistoru.

Kvůli delší vzdálenosti od místa měřené teploty bude vhodnější použít platinový rezistor o hodnotě 1000 Ω , u kterého nastane větší změna odporu vlivem změny teploty (cca. 3,85 $\Omega \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) než u platinových rezistorů menších hodnot. Tím bude částečně omezen vliv odporu vedení.



Obrázek 27 - Blokové schéma převodníku s platinovým rezistorem

Napěťový referenční zdroj (v místě LDO) jsem zvolil typ *MCP1541* od firmy Mikrochip o výstupní hodnotě napětí 4,096 V. Zvolil jsem si ho z důvodu doporučení v datasheetu k převodníku MCP 3551. Udaná maximální výchylka výstupu je sice 1 % od jmenovité hodnoty, ale vzhledem k výše uvedeným vlastnostem zapojení nebude mít vliv na výslednou přesnost.

Kvůli minimalizaci výstupního šumu a stabilizaci vůči vnějšímu rušení je vhodné dodržet doporučená zapojení, která obsahuje datasheet [17]. V mém případě se jednalo o vstupní a zatěžovací kondenzátory (C_1 a C_2 z Obr. 27), připojené k zemi. I když A/D převodník má ve svém vnitřním zapojení digitální filtr, rozhodl jsem se pro dodatečnou filtraci RC článkem. Ten je zapojený za zatěžovacím kondenzátorem a zajistí na výstupu filtraci šumu z vyšších harmonických do 15,9 Hz s útlumem 20 dB na dekádu podle vztahu (7.2).

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{FIL} C_{FIL}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10k\Omega \cdot 1\mu F} \approx 15,9 \text{ Hz} \quad (7.2)$$

Následuje napěťový dělič, složený z rezistorů R_A a R_B . Jejich velikost nesmí být příliš malá z důvodu vznikajícího ohřevu platinového rezistoru vyšší hodnotou protékajícího proudu. Z tohoto důvodu je vhodné zvolit jejich hodnotu řádově v tisících Ohmů. V mém případě jsem zvolil hodnoty rezistorů $R_A = R_B = 68 \text{ k}\Omega$.

Pro výpočet hodnoty odporu platinového rezistoru využijeme vztahu napětí v obvodu:

$$\frac{U_{Pt}}{U_{REF}} = \frac{R_{Pt}}{R_A + R_{Pt}}, \quad (7.3)$$

který lze upravit na následující tvar:

$$R_{Pt} = \frac{R_A \cdot \frac{U_{Pt}}{U_{REF}}}{1 - \frac{U_{Pt}}{U_{REF}}} \quad (7.4)$$

Při dosazení vzorce pro napětí platinového senzoru:

$$U_{Pt} = U_{REF} \frac{ADC_{kód}}{2^{(n-1)}} \quad (7.5)$$

dostaneme vztah (7.6).

$$R_{Pt} = \frac{R_A \cdot \frac{ADC_{kód}}{2^{(n-1)}}}{1 - \frac{ADC_{kód}}{2^{(n-1)}}} [\Omega] \quad (7.6)$$

Vztah pro výpočet teploty z hodnoty platinového rezistoru je roven:

$$R_{Pt} = R_0(1 + At + Bt^2) [\Omega], \quad (7.7)$$

kde

R_0 je hodnota platinového rezistoru při teplotě 0 °C, tj. 1000 Ω,

$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,

$B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$.

Kvůli velmi malé hodnotě konstanty B po umocnění ji můžeme zanedbat.

Vzorec pro vyjádření teploty bude:

$$t = \frac{R_{Pt} - R_0}{R_0 \cdot A} [^{\circ}\text{C}] \quad (7.8)$$

Tyto výpočty budou prováděny v reálném čase při měření teploty přímo v programu.

6.1.1 A/D převodník a komunikace s mikroprocesorem

Mikroprocesor je s A/D převodníkem propojený pomocí sběrnice SPI. Jedná se o sériové komunikační rozhraní, které se často využívá k propojení mikroprocesoru a periférií. Připojené obvody jsou na sběrnici rozděleny podle hierarchie na Master nebo Slave. V mém případě je ATmega88 po dobu komunikace nastavena jako Master (řídí komunikaci) a MCP3551 jako Slave.

Lze rozlišit dvě metody převodu dat v A/D převodníku.

Jednotlivý převod (Single Conversion Mode) začíná náběžnou hranou signálu \overline{CS} do aktivní nuly. Pokud se v době převodu objeví další náběžná hrana \overline{CS} , dokončí se probíhající převod a další už automaticky nenastane. Po vlastní době konverze převodník přejde do režimu spánku. Změna stavu signálu \overline{CS} během vlastní doby převodu (t_{conv}) nemá žádný vliv na probíhající převod a ani nemůže další spustit. Po 25. hraně signálu SCK se dokončí převod, výstup SDO přejde do aktivní 1 a jsou na něm převedená digitální data, připravená k přenosu do mikroprocesoru. Převodník se poté vypne (shutdown mód). Další konverze neproběhne, ale je nutné ji znovu spustit.

Při *kontinuálním převodu (Continuous Conversion Mode)* jsou data ze SCK nastaveny na sestupnou hranu signálu. Po sestupné hraně hodin se objeví 24bitové slovo ve dvojkovém doplňku (22 bitů dat ve dvojkovém doplňku + 2 bity přetečení) na sběrnici SPI, které je synchronizované na sestupnou hranu SCK. Rychlost konverze je dána vnitřním oscilátorem a jeho frekvencí, která je nastavena na 112,64 kHz.

Po dokončení převodu jsou data připravena k přenosu a k dalšímu převodu dojde automaticky (Obr. 28).

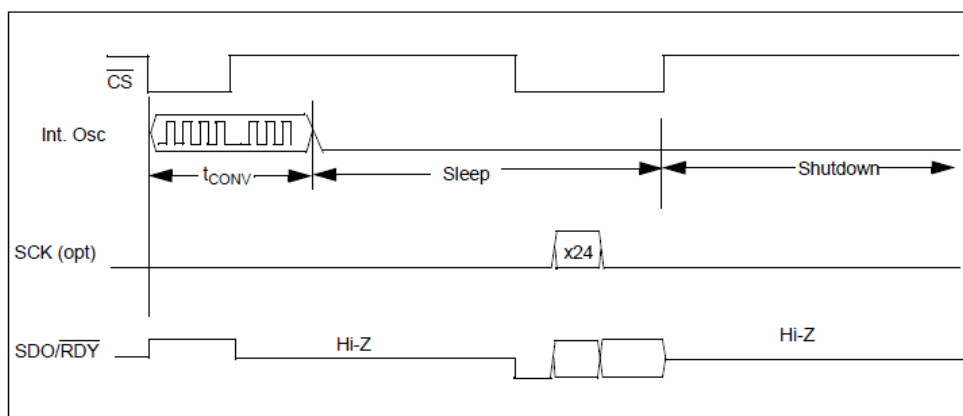


FIGURE 5-2: Single Conversion Mode.

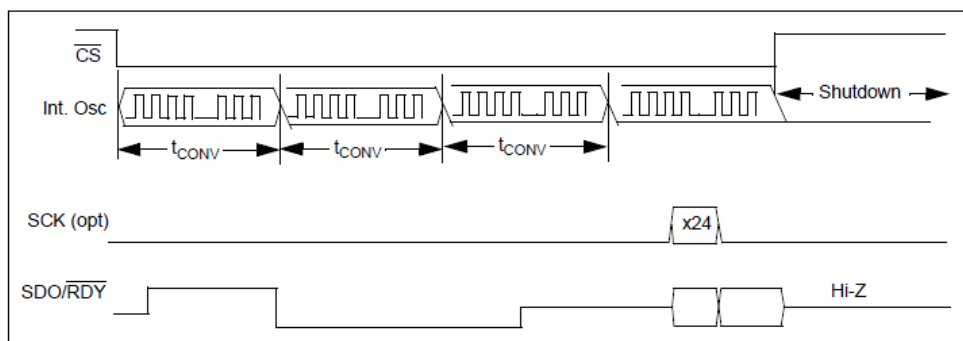


FIGURE 5-3: Continuous Conversion Mode.

Obrázek 28 - Módy převodu A/D převodníku MCP 3551 [18]

Z těchto dvou módů převodu jsem si vybral kontinuální převod, protože u něj odpadá nutnost spouštění dalšího nového převodu. Přenos dat bude probíhat nepřetržitě po dobu převodu na sběrnici ISP s rychlostí 125 kHz, která je nastavena v registru SPCR bitem 1 a 0 jako dělení kmitočtu 64. Tato rychlost je k převodu dostačující – vyšší rychlost by mohla způsobit nežádoucí rušení. Signál \overline{CS} bude po dobu převodu aktivní v 0 a SPI port mikroprocesoru je nutné nastavit reakci na sestupnou hranu hodinového signálu SCK – k tomu slouží registr SPCR, bit 2: CPHA.

Signál SCK jsem nastavil jako aktivní v logické 0. Tento mód, nazvaný SPI 1,1, umožní přenos skupiny dat o 3 bajtech při 24 hodinových cyklech.

6.2 Mikroprocesor ATmega88

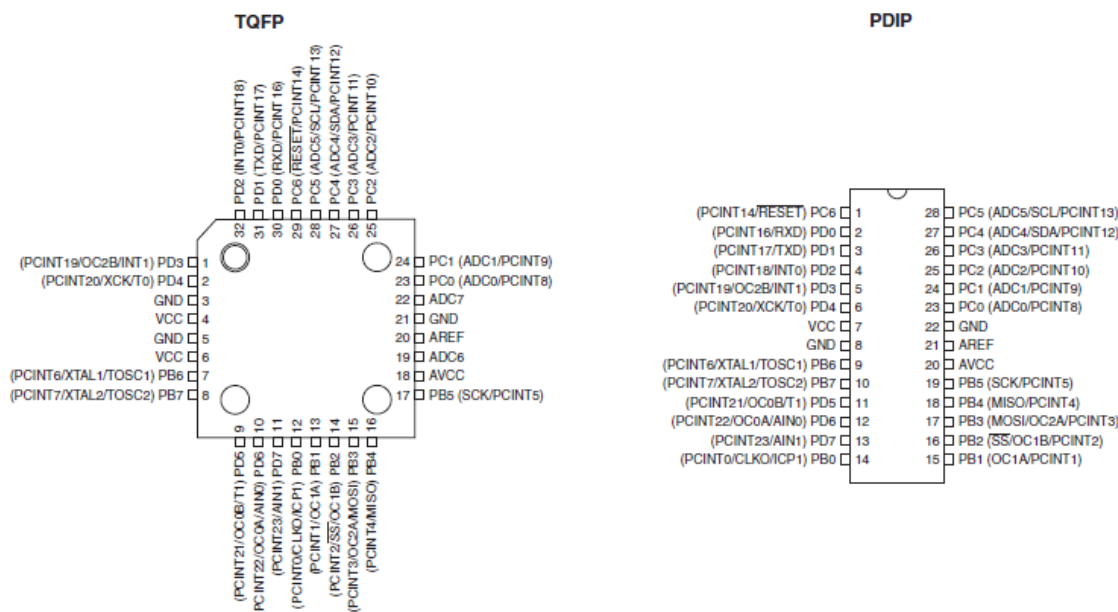
Tento procesor od firmy Atmel jsem si vybral proto, že jeho parametry, uvedené níže, budou dostačovat pro načítání dat z externího A/D převodníku, zobrazování dat na LCD displeji, uživatelskou volbu pomocí tlačítek, generování řídicích impulsů do relé a pro spouštění programu, nahreného v paměti FLASH. (Bylo by možné použít i jiný mikroprocesor, např. od firmy PIC, který by měl podobné parametry, ale s těmito mikroprocesory jsme ve škole nepracovali.)

ATmega88 disponuje:

- RISC architekturou, která využívá sadu 132 optimalizovaných instrukcí,
- 8 kB programové FLASH paměti,
- 512 kB paměti EEPROM,
- 1Kb paměti SRAM,
- 23 programovatelnými vstupně-výstupními piny,
- sériovým rozhraním SPI a USART,
- rychlostí CPU až 20 MHz při napájení 4,5 V až 5,5 V.

Taktovací frekvenci mikroprocesoru ATmega88, využívající vnitřní RC oscilátor, jsem nechal nastavenou na defaultní hodnotě 8 MHz. Tato rychlost bude vyhovující vzhledem k náročnosti operacím, které budu v mikroprocesoru využívat. Další nastavení frekvence a výběr oscilátoru je možné nastavit pomocí logických hodnot 4 bitů v registru CKSEL.

Mikroprocesor ATmega88 je dostupný ve dvou variantách pouzder TQFP a PDIP (Obr. 29).



Obrázek 29 – ATmega88 a varianty pouzder TQFP a PDIP [19]

6.2.1 Propojení mikroprocesoru s PC

Kromě výše zmíněného propojení mikroprocesoru s A/D převodníkem bude nutné zajistit propojení mikroprocesoru s počítačem – už jenom z toho důvodu, že program, který bude řídit pájecí pec, musí být do mikroprocesoru nahrán.

Jednou z možností je systémové programování, označované jako *ISP*. Tento způsob je velmi rozšířený, protože s ním lze mikroprocesor naprogramovat ve vývojovém prostředí AtmelStudio spolu s možností odladění programu. Pokud už je mikroprocesor zapájený, stačí mít na DPS vyvedené odpovídající vývody na port ISP (Obr. 30).



Obrázek 30 - Zapojení ISP konektoru (6. vodičové)

Programátor je nutné použít takový, aby byla splněná kompatibilita s vývojovým prostředím. Vyhovující je např. AVR Dragon nebo AVRISP mkII.

Při nahrávání programu do mikroprocesoru se není nutné obávat dalších problémů, vyplývajících z důvodu propojení s A/D převodníkem stejnou sběrnici, protože mikroprocesor je ve stavu RESET.

Pro rychlejší komunikaci s mikroprocesorem bez nutnosti přeprogramování FLASH paměti lze využít *rozhraní USART*. Jedná se o sériové komunikační rozhraní, které umožňuje oboustranný přenos dat jak synchronně, tak asynchronně.

Blokové schéma je složeno ze tří částí: generátoru hodin, přijímače a vysílače. Ty jsou navzájem propojeny datovou sběrnici. Generátor hodin obsahuje synchronizační logiku, která generuje synchronizační impulzy. Vysílač obsahuje zapisovací vyrovnávací paměť, sériový posuvný registr, generátor parity a řídicí jednotku pro obsluhu různých sériových rámců. Přijímač je nejsložitější částí, protože obsahuje jednotky pro obnovu hodin a dat.

Jednotka USART může komunikovat ve 4 základních režimech: v asynchronním režimu, v asynchronním režimu s dvojnásobnou rychlostí a v synchronním režimu s rozlišením Master – Slave. Režimy jsou zvoleny pomocí zapsané logické hodnoty bitu UMSEL do registru UCSRC (pro log. 1 odpovídá synchronní režim, pro log. 0 asynchronní režim).

V mém případě jsem nastavil: asynchronní režim, který využívá vodiče TXD a RXD, s přenosovou rychlostí pomocí registru UBRR0H a UBRR0L (stejnou pro přijímač i vysílač podle vzorce pro přenosovou rychlost: $UBRR = \frac{f_{osc}}{16 BAUD} - 1$), rámeček dat na 8 bitů dat + 2 stop bity pomocí registru UCSR0C a vytvořil funkce pro posílání textu.

6.3 LCD Displej

Pro zobrazení teploty a informací o aktuálním pájecím profilu jsem se rozhodl použít znakový LCD displej se šestnácti znaky po dvou řádcích. Na displeji je integrovaný řadič typu HD44780, díky kterému je usnadněný výběr předdefinovaných znakových sad a zjednodušených instrukcí pro operace s kurzorem a textem (displej má pro zpracování instrukcí vlastní mikroprocesor). Propojení displeje s ATmega88 je přes 4 bitovou sběrnici. Zbylé datové vodiče jsou uzemněny.

Pro komunikaci displeje s mikroprocesorem bylo nutné vytvořit knihovnu. Pod jednotlivými funkcemi jsou tu uložené operace pro inicializaci displeje a posílání instrukce (zapnutí nebo vypnutí displeje, smazání displeje apod.). Pro práci s textem jsou určeny funkce pro posun na libovolné souřadnice, vložení znaku a textového řetězce.

Měření a vypsání aktuální teploty bude implementováno v kódu jako funkce, která bude zobrazovat na LCD displeji informace o aktuální teplotě a pájecím profilu.

6.4 Regulace výkonu

Jak již bylo naznačeno v 5. kapitole, nejvhodnější možností řízení výkonu pece vzhledem k minimalizaci rušení bude použití regulátoru s tyristorem se spínáním v nule.

Tyto vlastnosti splňuje polovodičové relé KSD210AC8 (Obr. 31).



Obrázek 31 - Relé KSD210AC8 [20]

Generování pulzů do vstupu V_{IN} pro řízení relé bude zajištěno pomocí výstupu mikroprocesoru PD6, který bude přiveden vodičem na relé přes ochranný rezistor kvůli proudovému omezení. Protože se relé nenachází na DPS s mikroprocesorem, není z tohoto důvodu zakresleno ve schématu ani v návrhu DPS.

K regulaci teploty pájení bude využit princip dvoustavové regulace. Pokud se v programu spustí funkce ON k topení, mikroprocesor nastaví výstup PD6 do logické 1. Tím je topení nastaveno na 100 % výkonu a relé protéká maximální napětí a proud. Pokud dojde k funkci OFF, která topení vypne nastavením výstupu PD6 do logické 0, relé neprotéká žádné napětí a proud.

6.5 Program pro řízení pájecí pece

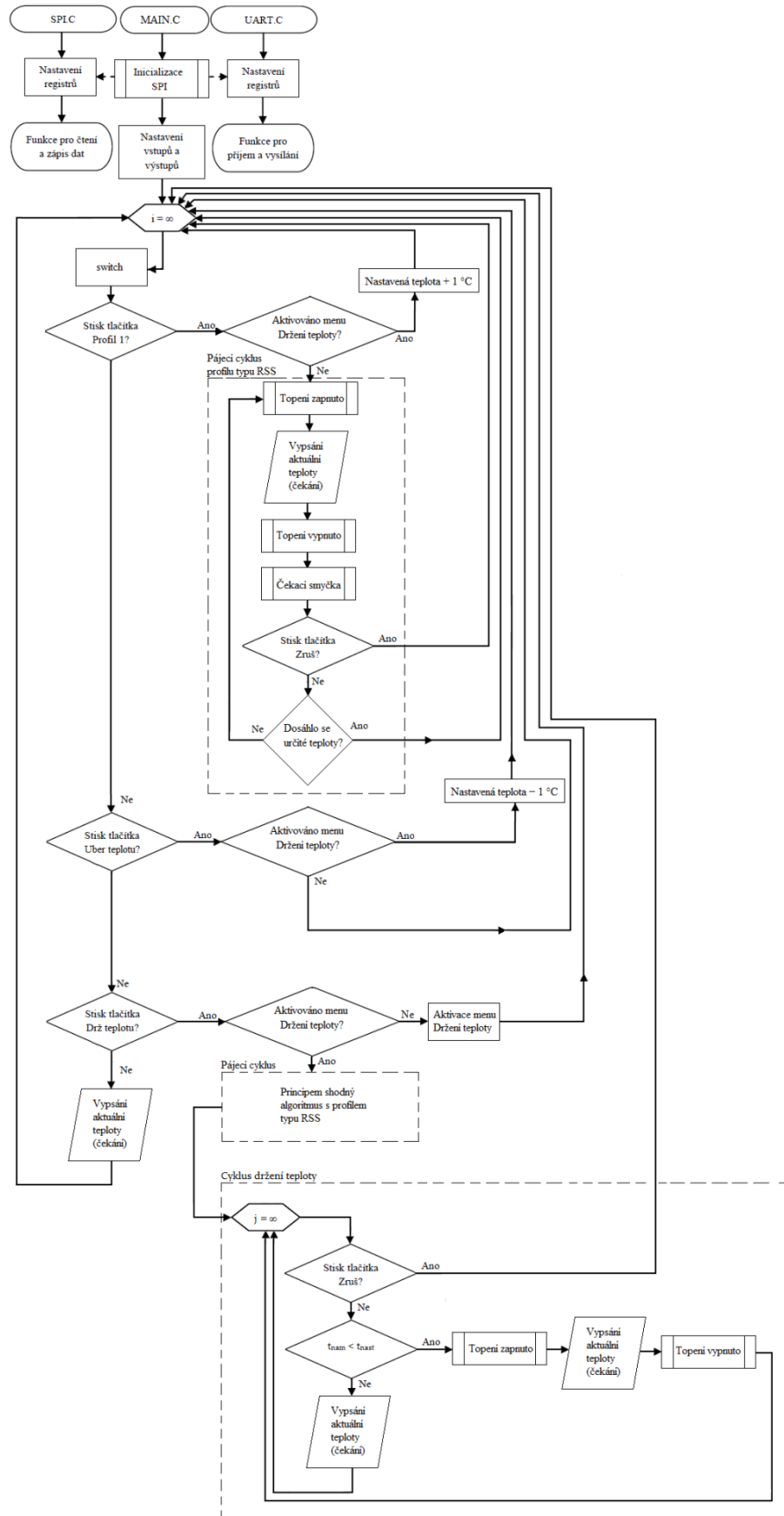
Při programování jsem se rozhodl pracovat s jazykem C ve vývojovém prostředí AtmelStudio6, které umožňuje ladění, debugging a opravu syntaktických chyb v programu.

Aby byl program přehlednější, je vhodné využívat rozdělení na jednotlivé soubory, ve kterých jsou uloženy např. funkce pro obsluhu periférií. V mém případě se jedná o soubory SPI.C, UART.C a jejich hlavičkové varianty.

Strukturu celého programu s funkční provázaností jednotlivých souborů znázorňuje vývojový diagram (Obr. 32) na následující straně. Bohužel se v této fázi vyskytl problém v komunikaci se znakovým displejem – vhodným náhradním řešením bylo řízení komunikace přes terminál pomocí sériové linky a PC.

Tlačítka slouží k vyvolání podprogramů:

- „*Profil*“: pájecí profil pasty firmy KOKI [21] a alternativní funkce „*Přidej teplotu*“ s krokem po 1 °C (pin PD2),
- „*Uber teplotu*“: alternativní funkce dekrementace u nastavení držené teploty s krokem po 1 °C (pin PD3),
- „*Přidej teplotu po 10 °C*“: alternativní funkce v případě stisku obou předcházejících tlačítek u nastavení držené teploty s krokem po 10 °C (piny PD2 a PD3 současně),
- „*Drž teplotu*“: nastavení teploty uživatelem v rozsahu od teploty v místnosti do 400 °C pomocí funkce „*Přidej teplotu*“, „*Uber teplotu*“ a „*Přidej teplotu po 10 °C*“. Po opětovném stisknutí tlačítka bude pomocí topení dosaženo nastavené teploty a spustí se držení teploty (pin PD4).
- „*Zruš*“: při nevhodné volbě uživatelem umožňuje zrušit právě probíhající operaci (pin PD5).



Obrázek 32 – Vývojový diagram

6.6 Návrh DPS

Pro návrh DPS jsem se rozhodl použít program Eagle 6.2.0 od firmy Cadsoft, protože jsem s ním měl zkušenosti při práci ve škole. Studentská verze programu je sice limitována velikostí dvouvrstvé DPS do 80x100 mm, ale tento rozměr mě nijak neomezoval, protože většina použitých součástek smíšené montáže (SMD, THT) má miniaturní rozměry.

Při návrhu jsem se snažil dodržovat základní pravidla pro návrh elektronických zařízení, konkrétně oddělení analogové části od digitální. Ta je především zajištěna rozmístěním komponentů na DPS a izolací pomocí rozlité země.

Pro kontrolu jsem využil funkce, kterými Eagle disponuje: kontrolu správnosti signálů ve schématu a kontrolu DPS pro izolační vzdálenosti. Tím se mi podařilo odhalit některé chyby v rámci navrhování.

Schéma a DPS v grafické podobě jsou k dispozici v Příloze A a B (kromě relé, které je umístěno mimo DPS).

6.7 Kalibrace senzoru

Po připojení platinového senzoru dvěma vodiči o délce cca. 0,5 m k DPS byla údaj o změřené teplotě zkrácen zřejmě projevením parazitních vlivů (odpor vedení, přechodový odpor spoje apod.). Z tohoto důvodu ho bylo nutné kalibrovat jiným vhodným měřicím přístrojem. Zvolil jsem školní multimetr V&A VA17 s připojitelným termočlánkem s měřicím rozsahem -55 °C až +1000 °C a relativní chybou 2 % od naměřené hodnoty, který bude svou přesností vyhovovat (není třeba vysoké přesnosti, protože teplota v programu je ukládána v celých číslech) [22].

Samotná kalibrace probíhala tak, že u obou senzorů (srovnávacího termočlánku a kalibrovaného platinového rezistoru) byla zaznamenána jejich aktuální teplota v učebně. Poté byly oba ohřáté o menší změnu teploty a po ustálení byla zaznamenána tato hodnota teploty. Hodnoty jsou dokumentovány v (Tab. 5). Ze vztahu (7.9) byla určena kalibrační konstanta, kterou je nutné vynásobit proměnnou, zastupující měřenou teplotu v programu.

$t_{1 \text{ Pt } 1000} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{1 \text{ V\&A VA17}} [^{\circ}\text{C}]$
28	24,3
$t_{2 \text{ Pt } 1000} [^{\circ}\text{C}]$	$t_{2 \text{ V\&A VA17}} [^{\circ}\text{C}]$
38	34,7
$\Delta t_{\text{Pt } 1000} [^{\circ}\text{C}]$	$\Delta t_{\text{V\&A VA17}} [^{\circ}\text{C}]$
10	10,4

Tabulka 5 – Hodnoty teploty senzorů při kalibraci

$$konst = \left(t_{nam} \cdot \frac{\Delta t_{VA17DMM}}{\Delta t_{Pt 1000}} \right) - konst_2 [-] \quad (7.9)$$

t_{nam} – aktuální teplota platinového senzoru

$konst_2$ – dorovnávací konstanta

Po dosažení naměřených hodnot z (Tab. 5 na předcházející straně) bylo nutné odečíst dorovnávací konstantu, o kterou byla hodnota teploty termočlánku nižší.

Výsledný vztah, aplikovaný v programu, má tvar:

$$konst = (t_{nam} \cdot 1,04) - 4,82 [-]. \quad (8.0)$$

6.8 Nastavení pájecího profilu a držení teploty

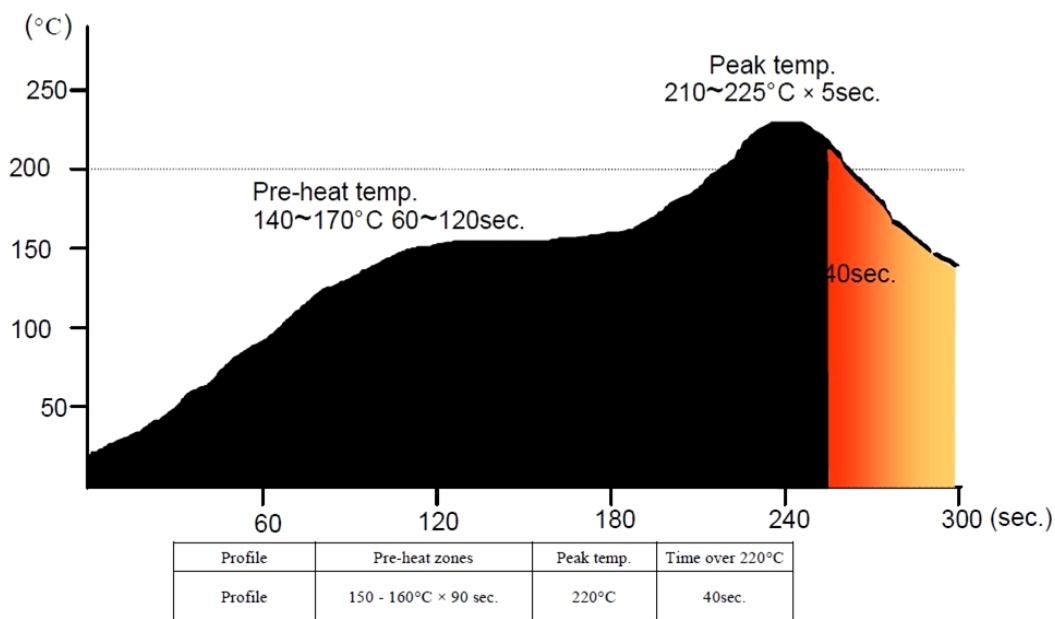
Jak již bylo nastíněno v principech dvoustavové regulace, nastavený výkon topení je poměr času, kdy je topení zapnuté, k času, kdy je topení vypnuté (proto někdy také ON/OFF regulace). Jako pec byl použit větší toustovač o objemu asi 3 litrů a výkonu 800 W.

U pájecího profilu bylo nejprve nutné nastavit *předehřívací zónu*. V ní by neměl být teplotní gradient (nárůst teploty v čase) větší než $4 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$, čas předehřátí by se měl podle katalogového listu pájecí pasty KOKI pohybovat v intervalu 60 s – 120 s a teplota předehřátí by měla dosáhnout hodnot $140 \text{ }^\circ\text{C} - 170 \text{ }^\circ\text{C}$. Nastavení bylo provedeno empiricky: pokud nebylo dosaženo vhodného teplotního gradientu, musela být změněna délka čekací smyčky nebo čas, kdy je topení zapnuté. Toto měření a nastavování bylo časově náročnější, protože před každým novým nastavením (změnou v programu) bylo nutné nechat toustovač delší dobu vychladnout, dokud v něm měřená teplota nedosáhla teploty místnosti.

Po dokončení této zóny (dosažení teploty $150 \text{ }^\circ\text{C}$) je vypsán na obrazovku čas jejího trvání v sekundách.

Vyrovnávací zónu nebylo nutné nijak nastavovat, protože v tomto případě je topení vypnuté a teplota uvnitř se mění pouze v malém rozmezí teplot důsledkem teplotního gradientu vnitřního prostředí. Čas trvání vyrovnávací zóny by měl podle teoretických předpokladů trvat v intervalu 20 s až 30 s, který se bude lišit podle velikosti použité DPS a počtu součástek. Pro základní nastavení jsem zvolil hodnotu 25 s. Odpočet je v programu zajištěn dekrementací proměnné.

Přetavovací zóna byla nastavena podobným způsobem jako předehřívací. Její trvání je proměnlivější v intervalu 30 s – 90 s (podle teplotního gradientu). Během této doby teplota narůstá, až dosáhne vrcholu přetavení ($225 \text{ }^\circ\text{C}$), který nesmí překročit, aby nedošlo k poškození součástek. Zároveň je nutné zajistit, aby se teplota vrcholku přetavení neměnila. Situaci ilustruje doporučený pájecí profil pájecí pasty KOKI (Obr. 33) na následující straně.



Obrázek 33 – Doporučený pájecí profil pasty KOKI [21]

V programu je nárůst teploty realizován obdobným způsobem jako při předehtání, ale s kratší dobou čekání a tím i vyšším výkonem. Stejně nastavení teplotního gradientu jako v případě předehtání by způsobilo nižší nárůst teploty, protože počáteční teplota uvnitř toustovače je vyšší. Pokud teplota dosáhne 223 °C, vlivem dopravního zpoždění systému vystoupá ke 225 °C a tam setrvá po dobu 5 s (v tomto intervalu není spuštěno topení). Díky tomuto nastavení maximální teplota přetavení nepřekročí hranici 225 °C a nemění se. Po dokončení této zóny je vypsán na obrazovku čas jejího trvání v sekundách.

Chlazení probíhá v délce 40 s a je realizováno dekrementací proměnné, zatímco se vypisuje naměřená teplota, tudíž nebylo nutné nic jiného nastavovat.

Naměřené parametry jednotlivých zón jsou dokumentovány v (Tab. 6).

Druh zóny	Délka zóny [s]	Interval teplot [°C]	Výkon topení [%]
Předehtávací	101	0 – 155	89,25 (cca. 830 ms ON, 100 ms OFF)
Vyrovnávací	25	155 – 157	0
Přetavovací	103 – 107	155(157) – 225	96,5 (cca. 830 ms ON, 30 ms OFF)
Chlazení	40	225 – 60	0

Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pájecího profilu

Z těchto hodnot je patrné, že při citlivém nastavení topení bylo možné dosáhnout přesné regulace teploty pro daný pájecí profil bez větších problémů.

K nastavení *držení teploty* byl využit jednoduchý algoritmus, pomocí kterého bylo topení nastaveno na 100 % výkonu (vzhledem k velikosti teplotního gradientu, dosaženého v profilu při téměř maximálním výkonu) a pokud se dosáhlo nastavené teploty, vypnulo se a na obrazovku byla vypsána informace o dosažení teploty. Pokud byla teplota v následujících okamžicích nižší než nastavená, topení bylo opět zapnuto, pokud vyšší, tak vypnuto. V programu bylo *držení teploty* realizováno jednoduchými podmínkami se zapnutým a vypnutým topením v nekonečné smyčce – přerušení *držení teploty* je možné pomocí tlačítka „Zruš“.

Naměřené hodnoty při různých nastaveních jsou zachyceny v (Tab. 7).

Nastavená teplota [°C]	Dosažená teplota po prvním topení [°C]	Interval okolo nastavené teploty v průběhu držení teploty [°C]
50	74	± 3
100	117	± 2
150	160	± 2
200	205	± 2
250	252	± 2
300	302	± 2

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty režimu držení teploty

Z prvních naměřených hodnot je možné pozorovat značný vliv dopravního zpoždění tepelného systému (zejména do nastavené teploty 100 °C), který se projeví překmitnutím přes žádanou hodnotu, i když je topení při dosažení nastavené teploty vypnuté. Naštěstí se velikost překmitu dále nezvyšuje (projeví se pouze poprvé, po druhém dosažení nastavených hodnot platí hodnoty intervalů v pravém sloupci), ale stabilizuje se zvýšením nastavené teploty.

Závěr

Cílem této bakalářské práce byla konstrukce měřicí a řídicí jednotky pro pec, upravená na pájení SMD součástek, která dokáže dodržovat teplotní profil, umožňuje držení teploty a disponuje uživatelským rozhraním.

V rámci praktické části se mi podařilo navrhnout DPS s mikroprocesorem, externím A/D převodníkem s napětovou referencí a znakovým LCD displejem, propojenou s polovodičovým relé, které je připojeno na síťový přívod toustovače. Po osazení DPS součástkami jsem přišel na nedostatky, způsobené chybným návrhem knihovny v programu Eagle. Jednalo se o záměnu některých vývodů u napětové reference, A/D převodníku a LCD displeje. Problém u napětové reference byl vyřešen náhradou za samotné napájecí napětí o velikosti 5 V, přivedené přímo na A/D převodník. Vzhledem k funkci by tato změna neměla mít vliv na výslednou přesnost. Menší nedostatky, jako přehozené 2 vývody u A/D převodníku a LCD displeje, byly vyřešeny přemostěním pomocí vodičů.

Při programování softwaru se mi nepodařilo komunikovat s připojeným znakovým LCD displejem. Po důkladné kontrole signálů osciloskopem byla chyba v návrhu vyloučena, pro jistotu byl displej vyměněn za jiný, ale bohužel bez výsledku. Náhradním řešením bylo využití sériové linky pro komunikaci s PC pomocí sériového terminálu s programem Realterm, který umožňuje sledovat vypisovanou aktuální teplotu spolu s dalšími informacemi na obrazovce.

V průběhu měření byl navržen a vyzkoušen teplotní profil pájecí pasty KOKI s vyhovujícími hodnotami teplot jednotlivých zón a jejich trváním v sekundách. Dvoustavová regulace se ukázala jako vhodné řešení pro nastavení teplotního gradientu v předehřívací a přetavovací zóně v úzkém rozsahu hodnot $3\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1} - 4\text{ °C}\cdot\text{s}^{-1}$, i když se jednalo o časově náročnější proces empirického nastavování. Pro další úpravu zón byla vytvořena funkce, která vypíše délku trvání předehřátí a přetavení na obrazovku.

V případě měření režimu držení teploty byly odměřeny nastavené hodnoty teploty od 50 °C do 300 °C. V případě nižší nastavené teploty se negativně projevil vyšší překmit přes žádanou hodnotu, který je způsobený dopravním zpožděním tepelné soustavy. Tento problém by bylo možné vyřešit použitím PID – regulátoru. U ostatních nastavených teplot se tento jev výrazným způsobem neprojevil. Při všech nastavených teplotách bylo dosaženo malého intervalu teplot okolo držené teploty v rozmezí 2 °C – 3 °C.

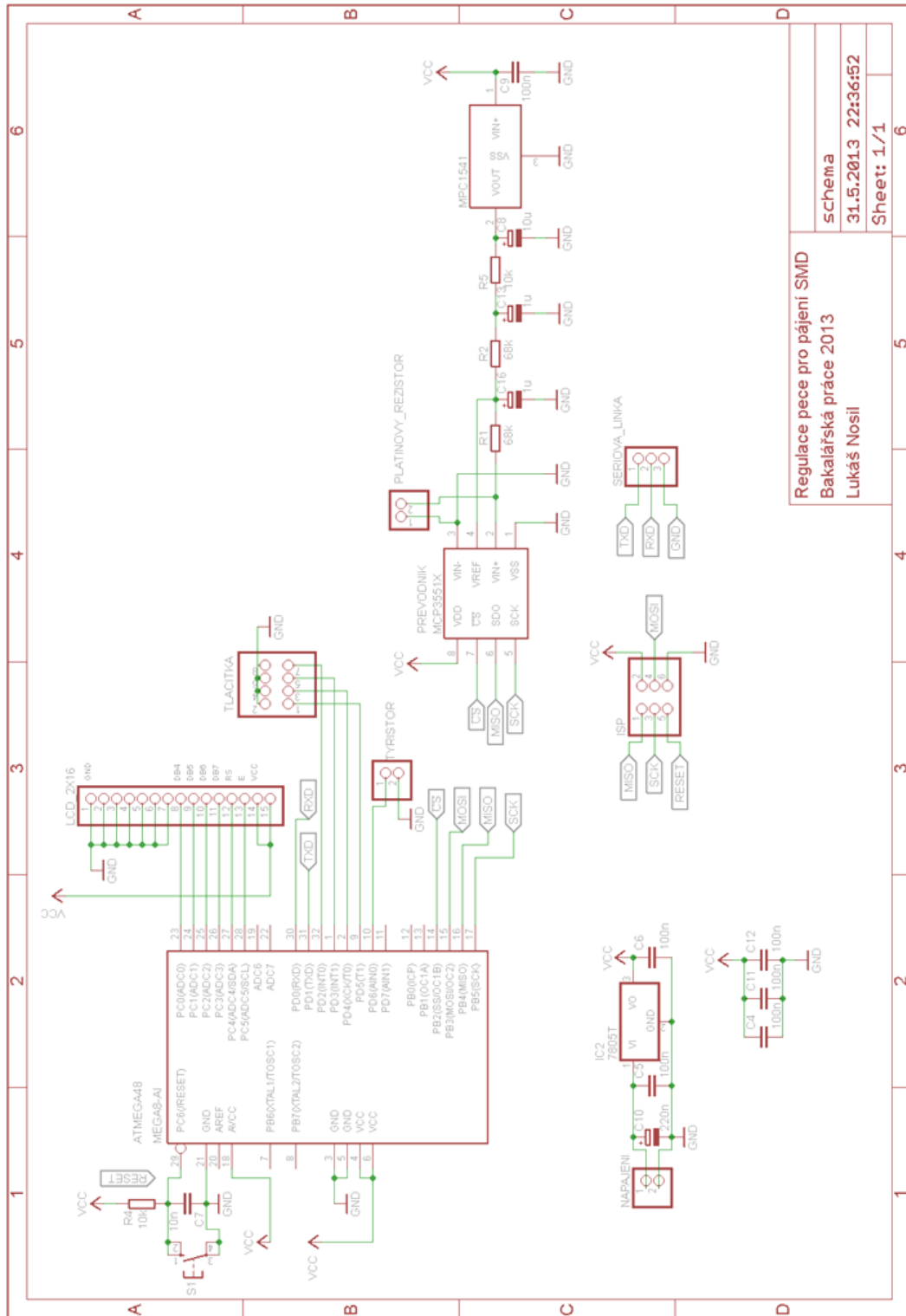
Protože jsem takto větší projekt programoval poprvé, určitě by bylo možné lépe optimalizovat zdrojový kód, dosáhnout tak menší velikosti v paměti a použít menší mikroprocesor. V případě nastavení profilu by bylo vhodné k urychlení chlazení zavést nucenou konvekci pomocí ventilátoru s řízenými otáčkami (tento problém jsem řešil pootvřením dvířek toustovače). Dalšími vylepšeními by mohla být zvýšená rychlost reakce tlačítek na stisknutí a vyřešení problému v komunikaci s LCD displejem.

Literatura

- [1] **Starý, J., Kahle, P.** *Plošné spoje a povrchová montáž*. Vydavatelství VUT v Brně, 2004 [cit. 2013-03-06].
- [2] RoHS. ROT-HSWARE SPOL. S R.O. *RoHS* [online]. 2006 [cit. 2013-03-06].
Dostupné z: <http://www.rohs.cz/more.info.html>
- [3] Wikipedie. *Wikipedie* [online]. 2012 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Eutektikum>
- [4] Pastové tavidlo FluxPlus™. *Nordson EFD* [online]. 2013. vyd. [cit. 2013-03-20].
Dostupné z: <http://www.nordson.com/CS-CZ/DIVISIONS/EFD/PRODUCTS/SOLDER-PASTE/PASTE-FLUX/Pages/default.aspx>
- [5] Wikipedie. *Wikipedie* [online]. 2013 [cit. 2013-03-08]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Flux_%28metallurgy%29
- [6] Plynová páječka ESTH. uni-max.cz - *unitechnic.cz s.r.o.* [online]. 2013 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.uni-max.cz/plynova-pajecka-esth/d/>
- [7] Plynová páječka Portasol ProPiezo. Conrad Electronic Česká republika, s.r.o. [online]. 2013 [cit. 2013-03-20]. Dostupné z: <http://www.conrad.cz/plynova-pajecka-portasol-propiezo.k811858>
- [8] Bench Top Reflow Oven TA962. ECVV Co., Ltd. [online]. 2013 [cit. 2013-03-20].
Dostupné z: <http://www.ecvv.com/product/3711065.html>
- [9] Průběžná pájecí pec T-960. HotAir.cz - *STUMobil* [online]. 2013 [cit. 2013-03-20].
Dostupné z: http://www.hotair.cz/osp_p.php?a=27
- [10] Pájení laserem. ABE.TEC, s.r.o. *SMT centrum* [online]. 2010 [cit. 2013-03-20].
Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/pajeni-laserem/pajeni-laserem/>
- [11] **SZENDIUCH, Ivan.** Pájení a bezolovnaté pájky. In: *Printed s.r.o.* [online]. 2010 [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: <http://www.printed.cz/assets/photos/pb-free.pdf>
- [12] **CVEJN, Jan.** *Regulace a automatizace: Přednášky v rámci projektu E-LEARN z předmětu KŘP/IREGE*. 2012 [cit. 2013-03-21].
- [13] **ŠULC, Bohumil a Miluše VÍTEČKOVÁ.** *Teorie a praxe návrhu regulačních obvodů*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 333 s. ISBN 80-010-3007-5.
- [14] SPŠ A VOŠ CHOMUTOV. *Automatizace 2*. 113 s. [online]. [cit. 2013-03-21].
Dostupné z: <http://web.spsev.cz/~madaj/skra4.pdf>
- [15] **KREIDL, Marcel.** *Měření teploty - senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-145-4. [cit. 2013-03-06].

- [16] Precision RTD Instrumentation for Temperature Sensing. Microchip Technology Inc. [online]. 2008 [cit. 2013-04-02].
Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01154a.pdf>
- [17] MCP1541. Microchip Technology Inc. [online]. 2005 [cit. 2013-03-30]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21653b.pdf>
- [18] MCP3551. Microchip Technology Inc. [online]. 2009 [cit. 2013-04-10]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21950b.pdf>
- [19] ATmega48/88/168. Atmel Corporation [online]. 2011 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z:
<http://www.atmel.com/images/doc2545.pdf>
- [20] KSD210AC8. GM electronic, spol. s.r.o.[online]. 2013 [cit. 2013-04-14]. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/ssr-pro-montaz-na-chladic/ksd210ac8-p635-025/>
- [21] KOKI. *Hi-performance NO CLEAN SOLDER PASTE*. Brno, 2000 [cit. 2012-10-02].
Dostupné z: http://www.koki.org/Files/pdf/Paste/T_SE%28S%2948-M955.pdf
- [22] V&A VA17 - Digital multimeter. Atel Electronics [online]. 2013 [cit. 2013-06-24].
Dostupné z: <http://www.atel-electronics.eu/produkt.php?hash=03982>

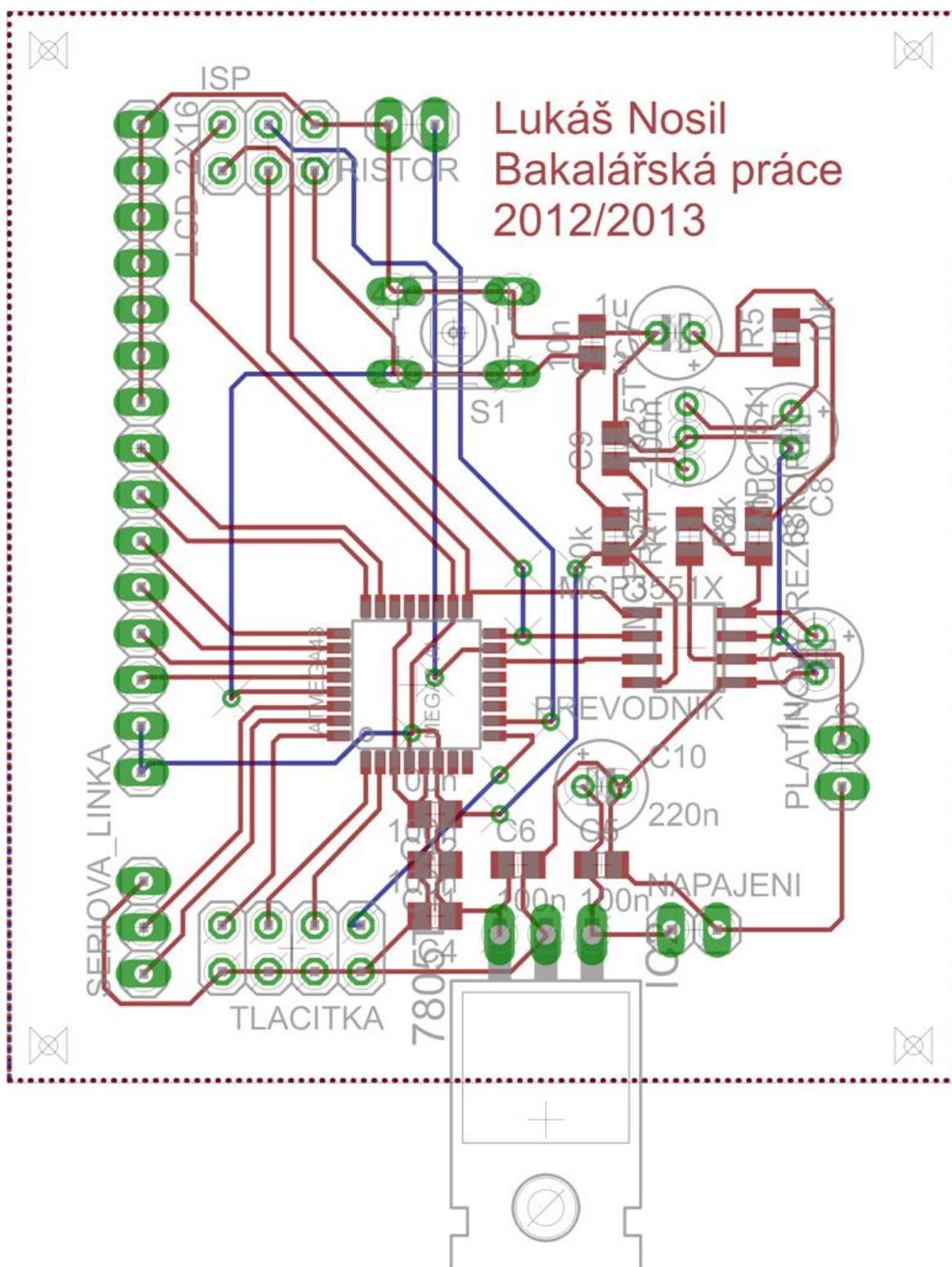
Příloha A – Schéma zapojení mikroprocesorové části



Regulace pece pro pájení SMD
 Bakalářská práce 2013
 Lukáš Nosil

Schema
 31.5.2013 22:36:52
 Sheet: 1/1

Příloha B – DPS mikroprocesorové části



Příloha C – CD

Eagle – adresář se schématem a návrhem DPS

RegPec – adresář se zdrojovými a hlavičkovými soubory

BakPrace – adresář s elektronickou verzí bakalářské práce