

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Martin Mňahončák

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Pájecí deska
Martin Mňahončák

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Mňahončák**
Osobní číslo: **I22058**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Pájecí deska**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh pájecí desky pro přetavení, případně předeřev DPS. Teoretická část práce popíše pájecí proces, teplotní profily a jejich části. Provede rozbor možností ohřevu (topné elementy a řízení výkonu na nich) a měření teploty. Hrubý odhad topného výkonu pro stanovenou rychlost ohřevu a zvolenou konstrukci (velikost).

Praktická část pak provede návrh, konstrukci a ověření pájecí desky s vlastní elektronikou, schopné ohřevu dle definovaných profilů, případně držet teplotu při použití jako předeřevu.

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

Seznam doporučené literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003.336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

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

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

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

L.S.

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

V Pardubicích dne 6. ledna 2025

Prohlášení autora

Prohlašuji:

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

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

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

V Pardubicích dne

Martin Mňahončák v.r.

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu mé závěrečné práce za cenné rady, odborné vedení a podporu během celého procesu tvorby práce. Dále děkuji své rodině za jejich neustálou podporu, trpělivost a pochopení, které mi umožnily věnovat se práci naplno.

Anotace

Tato závěrečná práce se věnuje návrhu, konstrukci a ověření funkčnosti zařízení určeného k řízenému pájení SMT součástek metodou reflow. Práce obsahuje teoretickou část, ve které jsou popsány principy pájení, použité materiály, typy pájek a metody regulace teploty. V praktické části je detailně popsána realizace zařízení, výběr komponent, konstrukce topného tělesa a návrh elektroniky s důrazem na bezpečnost a přesnost regulace. Výsledky experimentálního ověření potvrzují význam použití PID regulace pro dosažení stabilních a přesných teplotních profilů během pájení. Navržené zařízení představuje efektivní a ekonomicky dostupné řešení.

Klíčová slova

Pájení, SMT součástky, reflow pájení, PID regulace, teplotní profil, elektronika, řízení teploty, topné těleso, prototypové zařízení, bezpečnost zařízení

Title

Soldering Plate

Annotation

This thesis focuses on the design, construction, and functionality verification of a device intended for controlled soldering of SMT components using the reflow method. The thesis consists of a theoretical section, which describes the principles of soldering, materials used, types of solders, and temperature regulation methods. The practical section thoroughly details the realization of the device, component selection, heating element construction, and electronics design, emphasizing safety and accuracy in temperature regulation. Experimental verification results confirm the significance of PID regulation for achieving stable and precise temperature profiles during soldering. The designed device represents an efficient and economically accessible solution suitable for both amateur and small-scale serial applications.

Keywords

soldering, SMT components, reflow soldering, PID regulation, temperature profile, electronics, temperature control, heating element, prototype device, device safety

Obsah

| | |
|---|----|
| Úvod..... | 12 |
| 1 Teoretická část..... | 13 |
| 1.1 Pájení..... | 13 |
| 1.1.1 Definice pájení | 13 |
| 1.1.2 Klíčové vlastnosti pájeného spoje | 13 |
| 1.1.3 Parametry pájecího procesu | 15 |
| 1.2 Druhy pájek | 16 |
| 1.2.1 Měkké pájky | 16 |
| 1.2.2 Tvrdé pájky z těžkých kovů | 17 |
| 1.3 Pájení v atmosféře | 18 |
| 1.3.1 Pájení v peci s normální atmosférou | 18 |
| 1.3.2 Pájení v peci s ochrannou atmosférou..... | 18 |
| 1.4 Možnosti ohřevu..... | 19 |
| 1.4.1 Odporová topná tělesa..... | 19 |
| 1.4.2 Topné těleso PTC | 19 |
| 1.5 Měření teploty | 20 |
| 1.5.1 Odporová teplotní čidla..... | 20 |
| 1.5.2 Termoelektrické senzory | 21 |
| 1.6 Možnosti regulace | 22 |
| 1.7 Teplotní profily a jejich části | 26 |
| 1.8 Odhad topného výkonu zařízení..... | 27 |
| 2 Praktická část..... | 29 |
| 2.1 Výběr topného tělesa..... | 29 |
| 2.2 Konstrukce topného bloku | 30 |
| 2.3 Návrh desky plošných spojů | 31 |
| 2.3.1 Spínání topného bloku..... | 33 |
| 2.3.2 Měření teploty | 33 |
| 2.3.3 Ovládací prvky | 34 |
| 2.3.4 Mikrokontroler | 34 |
| 2.3.5 Ladící rozhraní | 34 |
| 2.4 Řízení teploty a softwarové řešení | 34 |
| 2.4.1 Ovládací prvky | 35 |

| | |
|---|----|
| 2.5 Realizace prototypu a ověření funkčnosti zařízení | 37 |
| Závěr..... | 41 |
| 3 Literatura..... | 42 |
| 4 Přílohy | 43 |

Seznam zkratek

| | |
|------------------|---|
| On | Zapnuto |
| Off | Vypnuto |
| DPS | Desky Plošných Spojů |
| P | Proporčně |
| PI | Proporčně Integračně |
| PID | Proporčně Integračně Derivační |
| °C | Stupně Celsia |
| s | Sekundy |
| ms | Milisekundy |
| ppm | Parts per million |
| PTC | Positive Temperature Coefficient |
| Pt | Platina |
| Ni | Nikl |
| K | Kelvin |
| µm | Mikrometr |
| mm | Milimetr |
| MRAS | Model Reference Adaptive Systém |
| STC | Self Tuning Controllers |
| SMT | Surface mount technology |
| SMD | Surface mount device |
| VAC | Volt Alternating Current |
| W | Watt |
| g | gram |
| kg | kilogram |
| J | Joule |
| LED | Light emitting diode |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| I ² C | Inter-Integrated Circuit |
| OLED | Organic Light Emitting Diode |
| MHz | Megahertz |
| MB | Megabyte |
| QFN | Quad Flat No-lead |
| UART | Universal Asynchronous Receiver/Transmitter |
| USB | Universal Serial Bus |
| Kp | Konstanta proporční složky |
| Ki | Konstanta integrační složky |
| Kd | Konstanta derivační složky |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - On/Off regulace [7] | 22 |
| Obrázek 2 - Blokové schéma PID regulace [8] | 23 |
| Obrázek 3 - Teplotní profil reflow [1] | 26 |
| Obrázek 4 - Topný blok (vlastní zpracování)..... | 31 |
| Obrázek 5 - Deska plošných spojů (vlastní zpracování) | 32 |
| Obrázek 6 - Blokové schéma zařízení (vlastní zpracování) | 32 |
| Obrázek 7 - Stavy uživatelského rozhraní (vlastní zpracování)..... | 35 |
| Obrázek 8 - Hlavní menu (vlastní zpracování) | 36 |
| Obrázek 9 - Výběr termočlánku (vlastní zpracování) | 36 |
| Obrázek 10 - Struktura ovládacího menu (vlastní zpracování) | 36 |
| Obrázek 11 - Teplotní křivka On/Off regulace (vlastní zpracování) | 38 |
| Obrázek 12 - Teplotní křivka otevřené smyčky (vlastní zpracování) | 38 |
| Obrázek 13 - Teplotní křivka PID regulace (vlastní zpracování) | 39 |
| Obrázek 14 - Přední strana zařízení (vlastní zpracování) | 40 |
| Obrázek 15 - Vnitřní část zařízení (vlastní zpracování)..... | 40 |

Úvod

Pájení patří mezi klíčové technologické procesy v elektronice, kde představuje hlavní metodu pro spojování elektronických komponent na deskách plošných spojů. Efektivita a kvalita tohoto procesu výrazně ovlivňuje výslednou spolehlivost, funkčnost a životnost elektronických zařízení. Tato práce se zaměřuje na návrh, realizaci a ověření funkčnosti vlastního zařízení pro řízené pájení SMT součástek metodou reflow. Hlavním cílem je vytvořit zařízení schopné přesně sledovat definované teplotní profily, a to za použití moderních regulačních metod, především PID regulace.

Práce se skládá ze dvou částí. V teoretické části jsou podrobně popsány základní principy a metody pájení, vlastnosti pájecích materiálů, a dále jsou analyzovány různé způsoby regulace teploty. V praktické části práce je popsán kompletní proces od výběru vhodných materiálů, přes návrh elektroniky až po realizaci funkčního prototypu zařízení. Důraz je kladen na bezpečnost, efektivní přenos tepla a snadnou ovladatelnost celého systému. Práce obsahuje také výsledky experimentálního ověření regulace teploty, kde je detailně srovnána klasická dvoustavová regulace s přesnou PID regulací, a potvrzuje význam PID regulace pro dosažení stabilního a přesného pájení.

1 Teoretická část

1.1 Pájení

1.1.1 Definice pájení

Pájení je proces spojování, při němž se používá přídavný kov (pájka) ke spojení základních materiálů, které zůstávají v pevném stavu. Podle konvence se u pájení používají slitiny s teplotou tavení nižší než 450 °C. Při pájení může, ale nemusí být použit tavídlivý prostředek, jehož úkolem je vyčistit povrch spoje, může však zanechávat zbytky. Díky nižším procesním teplotám oproti tvrdému pájení je pájení běžnou metodou při montáži elektronických zařízení. Lokální ohřev spoje lze provádět páječkou, indukčním ohřevem, laserem či horkovzdušnou pistolí. Celé soustavy lze rovněž ohřívat v peci. Existují i difuzní pájecí techniky, které kombinují teplotu a tlak. [1]

1.1.2 Klíčové vlastnosti pájeného spoje

Spoj mezi pájkou a základním materiálem není tvořen jen mechanickým uchycením nebo přilnavostí – i když i tyto faktory přispívají k pevnosti. Klíčovým rysem pájeného spoje je metalurgická vazba na rozhraní mezi přídavným a základním kovem. Pájka reaguje s malým množstvím základního kovu a smáčí jeho povrch vytvářením intermetalických sloučenin. Po ztuhnutí je spoj držen pohromadě stejnými silami mezi atomy, které drží i pevný kov pohromadě. Snadnost smáčení souvisí s tím, jak snadno probíhá rozpouštěcí reakce. Na tuto vlastnost má vliv kromě chemické reakce i čistota povrchu a povrchové napětí pájky. [1]

Při vlastním pájení se na spojované části přivádí teplo, čímž dojde k roztavení pájky a jejímu spojení s povrchem základního materiálu prostřednictvím smáčení. U laněných vodičů dochází k tzv. vzlínání, kdy je roztavená pájka vtažena mezi jednotlivé dráty kapilárními slitinami. Tento jev nastává také tehdy, jsou-li spojované díly těsně u sebe nebo v přímém kontaktu. [1]

Smáčení nezbytně zahrnuje metalurgickou interakci mezi pájkou a základním materiálem, který může vést k tvorbě intermetalických sloučenin. Tyto vrstvy vznikají na rozhraní jako výsledek chemické reakce, a mají odlišné vlastnosti než samotné kovy – jsou tvrdé, křehké, mají vysoký bod tavení a jsou chemicky odolné. Mezi běžné sloučeniny patří například zlato-cín, měď-cín nebo nikl-cín. Pokud je tato intermetalická vrstva příliš silná, může negativně ovlivnit fyzickou i mechanickou integritu spoje. [1]

Pájitelnost s jakou lze materiál spojit danou metodou pájení je klíčovou vlastností elektronických a dalších součástek. Ovlivňuje efektivitu výroby i spolehlivost finálního produktu. Dobrá pájitelnost je důležitá z hlavních důvodů: [1]

- Umožňuje použití méně aktivních tavidel, čímž se snižuje nutnost jejich následného čištění, to má ekologické přínosy a zároveň eliminuje možné problémy s korozí způsobenou zbytky tavidel. [1]
- Zvyšuje výtěžnost při prvním průchodu pájením, čímž se snižuje potřeba ručního opravování spojů což je důležité, protože přepracovaný spoj má často nižší odolnost vůči únavě, než spoj úspěšně provedený na první pokus. [1]

Pájitelnost závisí na schopnosti pájky smáčet spojované povrchy. Nedostatečnou pájitelnost lze do určité míry kompenzovat použitím aktivnějších tavidel, avšak s narůstající hustotou osazení součástek je obtížnější odstraňovat zbytky tavidel po montáži. Z tohoto důvodu se preferují méně aktivní tavidla. Enviromentální hlediska rovněž vedou k omezení používání některých tavidel. Náklady na kontrolu, testování a případně přepracování pájených spojů jen zvyšují požadavky na bezvadnou pájitelnost. Pájitelnost je složitý technický parametr. I když lze smáčivost měřit přímo, pájitelnost nelze přímo kvantitativně změřit, a vztah mezi smáčivostí a pájitelností zatím nebyl zcela objasněn. [1]

Tři klíčové aspekt pájetelnosti:

- Tepelná náročnost spoje
- Smáčivost povrchu
- Odolnost vůči tepelnému namáhání při pájení

Tepelné vlastnosti součástky musí umožnit zahřátí spoje na požadovanou teplotu během stanoveného času. Povrch musí být během této doby dostatečně smáčen roztavenou pájkou. Pájka a její tok tepla navíc nesmí narušit funkčnost samotné součástky. [1]

Každý z těchto aspektů lze optimalizovat pomocí vhodné volby pájecích slitin a řízením procesních parametrů. Z hlediska konstrukce a výkonu je nejpřísnějším omezením právě smáčivost komponent. [1]

Rozsah smáčení je dán rovnováhou povrchových a mezifázových energií. Například, pokud se kapka roztaveného kovu dostane na oxidovaný povrch, chybí zde kovová vazba a kapka má tendenci sbíhat se do kuličky a minimalizovat styčnou plochu – tedy nesmáčet. [1]

Povrchy kovových krystalů mají vyšší volnou energii než objemová struktura krystalu, protože na povrchu existují „nezapojené“ kovové vazby. Při kontaktu s roztaveným kovem se tyto vazby mohou „nasycovat“, čímž se snižuje povrchová energie systému. Pokud k takové výměně energie nedojde, smáčení nenastane a pájka se chová, jako by byla odpuzována. [1]

1.1.3 Parametry pájecího procesu

Parametry ovlivňující smáčení a šíření pájky zahrnují:

- Teplotu
- Čas
- Metalurgickou a chemickou povahu povrchů

Teplota

Teplota má zásadní vliv na smáčení i šíření pájky. Vyšší teploty zvyšují atomární aktivity, dodávají energii potřebnou k překonání povrchových bariér a exponenciálně zrychlují reakční rychlosti. Teplota také určuje fázové vztahy v dané slitině – ať už jde o vznik tuhých roztoků, nebo jejímu šíření, ale zároveň podporuje tvorbu oxidů, které mohou být při pájení problematické. [1]

Čas

Smáčení je časově závislý jev – ovlivňuje ho rychlost interakce pájky s podložkou, účinnost tavidla i tepelná vodivost materiálu. Proces pájení musí trvat dostatečně dlouho, aby měla pájka čas smáčet, proniknout či vzlínat do všech oblastí spoje. Důležité jsou jak doba do začátku smáčení, tak doba samotného šíření pájky. [1]

Metalurgická a chemická povaha povrchů

Vlastnosti povrchů mají na smáčení a šíření zásadní vliv. Důležitá je jak slitinová skladba, tak tekutost pájky. Například hranice zrn bývají smáčeny jinak než zbytky materiálu. Vznik tuhých roztoků či intermetalických fází může šíření podstatně ovlivnit. Oxidové vrstvy brání smáčení, protože pájka je zpravidla nesmáčí. Stejně tak organické nečistoty (např. oleje) zabraňují smáčení a vyžadují odlišné postupy čištění než samotné oxidy. [1]

K dosažení spoje je klíčový vhodný výběr základního kovu a pájecího procesu. Základní kovy se vybírají podle požadovaných vlastností součástky – pevnosti, tažnosti, vodivosti, hmotnosti, odolnosti vůči korozi atd. Pokud se má komponent pájet, měla by být pájitelnost jedním z výběrových kritérií. Výběr tavidla i povrchová příprava závisí na schopnosti daného kovu být smáčen pájkou. Pájitelnost kovů přitom nesouvisí pouze s jejich chemickou ušlechtilostí – např. ušlechtilé kovy netvoří oxidy, a proto se pájí dobře. Ale i některé neušlechtilé kovy jako je cín či kadmium se snadno pájí, přestože oxidují. Naopak kovy jako chrom, nikl a hliník, i když se pájí běžně, tvoří ochranné oxidy, které pájení ztěžují. Z toho důvodu vyžadují tyto kovy velmi aktivní tavidla. V mnoha případech je však použití takových tavidel omezené nebo zakázané, takže tyto „obtížně pájitelné“ materiály vyžadují speciální postup k dosažení opakovatelného výsledku. [1]

1.2 Druhy pájek

Všeobecně se pájky rozdělují podle teploty tavení na dvě hlavní skupiny.

- Měkké pájky – teplota tavení do 450 °C
- Tvrdé pájky – teplota tavení nad 450 °C[2]

1.2.1 Měkké pájky

Měkké pájky se vyznačují především pracovní teplotou a zároveň i malou pevností. Proto se používají pro takové spoje, které nejsou pevnostně a tepelně namáhány. Měkké pájky jsou slitiny těžkých kovů, které se taví při nízkých teplotách, například cín, olovo a kadmium. [2]

Měkké cínové pájky jsou slitiny cínu a olova, které se používají pro pájení při pracovních teplotách v rozmezí 190 až 350 °C. Cín, který je aktivní složkou těchto pájek, zajišťuje dobrou smáčivost, což je klíčová vlastnost pro kvalitní spojení. Obsah cínu v pájce významně ovlivňuje její pájecí vlastnosti. Naopak olovo, ač je součástí pájky, má špatnou smáčivost a neprochází metalurgickou reakcí se základním materiálem. Přítomnost i malého množství cínu (minimálně 3 %) nebo jiného vhodného prvku, zlepšuje pájecí vlastnosti pájky. [2]

V cínových pájkách se obsah cínu pohybuje v rozmezí 4 až 90 %. Pro hodnocení vlastností cínových pájek je klíčové pochopení jejich rovnovážné struktury. Eutektikum cínu-oliva vzniká při teplotě 183 °C a obsahuje 61,9 % cínu. Při této teplotě rozpouští cín pouze 2,6 % olova, zatímco olovo při eutektické teplotě rozpouští až 19,5 % cínu a vytváří s ním tuhý

roztok. Tento jev má významný vliv na pájecí vlastnosti, protože rozpustnost cínu klesá s teplotou. [2]

Na obou stranách eutektického bodu existují různé pájky s odlišnými intervaly tavení. Naopak pájky s obsahem cínu blízkým eutektickému bodu jsou ideální pro elektroniku a všechny aplikace, kde je požadována nízká pracovní teplota pájení. [2]

Měkké pájky speciální jsou pájky, které jsou navrženy pro splnění specifických požadavků, jako jsou odolnost proti korozi, vysoká elektrická vodivost nebo použití při zvýšených teplotách. Tyto pájky často obsahují slitiny jiných kovů, jako je stříbro, měď, antimon atd., které zlepšují jejich vlastnosti pro konkrétní použití. [2]

Při výběru pájky je důležité zohlednit jejich složení. Například pájky na bázi cínu a stříbra jsou ideální pro spoje, kde se vyžaduje vysoká odolnost proti korozi a lepší únosnost při vyšších teplotách než u běžných cínových pájek. Stříbro zlepšuje smáčivost a roztékavost pájky, zvyšuje elektrickou vodivost a snižuje teplotu tání. [2]

Do této kategorie patří také pájky s nízkou teplotou tání. Tyto pájky mají pracovní teplotu v rozmezí 120 až 180 °C. Některé z těchto pájek mohou být legovány i mědí nebo stříbrem, čímž se zvyšuje jejich odolnost a prodlužuje životnost páječek a dalších nástrojů. [2]

Speciální pájky pro zahrnují také slitiny, které jsou vyrobeny z kovů čistoty 99,99 %. Tyto pájky, legované ve vakuu, neobsahují oxidy, což zajišťuje jejich vysokou kvalitu a spolehlivost. Používají se zejména pro pájení piezoelektrických krystalů, elektrod, tranzistorů, polovodičů a dalších citlivých elektronických komponent. [2]

1.2.2 Tvrdé pájky z těžkých kovů

Tvrdé pájky se používají pro spoje, které jsou v provozu při teplotě +20 °C vystaveny vyššímu mechanickému namáhání nebo pracují-li pájené součástky za zvýšených či kryogenických teplot. Hlavními složkami těchto pájek jsou běžné nebo drahé kovy jako je měď, stříbro, nikl, železo či palladium. Tyto pájky se však pro pájení běžné elektroniky téměř nevyužívají. Najdou uplatnění spíše u speciálních napájecích konektorů nebo vysokofrekvenčních a mikrovlnných komponent, kde jsou zvýšené požadavky na mechanickou pevnost, tepelnou odolnost a elektrickou vodivost. [2]

1.3 Pájení v atmosféře

Při pájení se často používají různé druhy atmosfér, aby se lepšila kvalita pájení a minimalizovaly problémy s oxidací nebo znečištěním pájecího spoje. Při použití no-clean flux, které nevyžadují čištění po pájení, se reflow pájení často provádí v inertní atmosféře. Tato atmosféra zajišťuje lepší smáčivost pájky, což vede ke kvalitnějším pájecím spojům. Při reflow pájení v inertní atmosféře je důležité udržovat koncentraci kyslíku nízkou (nejlépe pod 20 ppm), což umožňuje dosáhnout optimálních výsledků s minimem zbytků fluxu. V některých případech může být reflow pájení úspěšně provedeno i s atmosférou kyslíku až 300 ppm, ale čím nižší je obsah kyslíku, tím širší je procesní okno pro kvalitní pájení. [2]

1.3.1 Pájení v peci s normální atmosférou

Pájení s normální atmosférou je vhodné pro větší součástky nebo pro pájení kovů, jako je měď. Tato metoda je vhodná, pokud není možné použít ochrannou nebo redukční atmosféru. V případě pájení v normální atmosféře je kladeno důraz na to, aby byly odstraněny povrchové oxidy a zbytky tavidla, což může ovlivnit kvalitu pájeného spoje. Tento proces je obvykle pomalejší než jiné metody, a proto je třeba pečlivě vybírat pájky s úzkým rozsahem tání, které minimalizují riziko likvidace spoje. Pro tento typ pájení je vhodné použít pájky a tavidla s dostatečně dlouhým reakčním intervalem, aby došlo k účinné reakci s oxidy před dosažením teploty tání pájky. [2]

1.3.2 Pájení v peci s ochrannou atmosférou

Při pájení v ochranné atmosféře je cílem chránit povrchy součástek před oxidací. Tato atmosféra vytváří podmínky, které zabraňují tvorbě nových oxidů na povrchu pájených součástek, což je klíčové pro dosažení kvalitního pájecího spoje. Ochranné atmosféry se používají zejména v případech, kdy je potřeba chránit citlivé kovové povrchy, které by mohly oxidovat při kontaktu s běžným vzduchem. Tato metoda je často používána u elektronických součástek, kde je důležitá minimální kontaminace a dlouhá životnost spoje. Při používání čistých ochranných plynů, bez přítomnosti kyslíku a vodních par, může v některých případech dojít k porušení stability povrchových oxidů, což může přispět k lepšímu kontaktu mezi pájkou a materiálem součástky. [2]

1.4 Možnosti ohřevu

1.4.1 Odporová topná tělesa

Odporový ohřev představuje jednu z nejrozšířenějších metod přeměny eklektické energie na teplo. Jeho princip spočívá ve využití Joulova jevu, při němž dochází k odvodu tepelné energie v důsledku odporu materiálu, kterým protéká elektrický proud. [3]

Pro konstrukci topných těles se používají speciálně vyvinuté materiály, převážně ve formě drátu nebo pásku. Mezi požadované vlastnosti těchto materiálů patří vysoká teplota tání, chemická stabilita v příslušné atmosféře, nízký koeficient odporu, odolnost vůči tepelným a mechanickým šokům a možnost tvarování. Nejčastěji používané materiály zahrnují slitiny železa, chromu a hliníku, nebo slitiny niklu a chrómu, které umožňují pracovní teploty až 1400 °C v závislosti na prostředí. [3]

Topné prvky jsou v konstrukci spotřebičů často umístovány ve formě vinutých spirál nebo cik-cak pásků, a to na stěny nebo do žlábků vyrobených z žáruvzdorných materiálů. Ve spotřební elektronice nebo domácích spotřebičích se využívají rovněž hotové topné patrony, často s magneziovou nebo oxid hlinitou izolací, které umožňují kompaktní a bezpečné provedení s výkonovou hustotou až 10 W/cm². [3]

1.4.2 Topné těleso PTC

PTC topné těleso je samoregulační prvek, jehož funkce je založena na změně elektrického odporu specifických keramických materiálů, nejčastěji na bázi titančitanu barnatého. Tyto materiály se vyznačují výrazným nárůstem elektrického odporu při dosažení určité teploty. V tomto bodě dochází k fázové přeměně, která je způsobuje prudký vzestup odporu, čímž se automaticky omezí tok elektrického proudu. Tato vlastnost zajišťuje, že se teplota tělesa stabilizuje bez nutnosti použití externího termostatu či řídicího systému. Díky tomuto samoregulačnímu efektu jsou PTC prvky schopné udržovat stabilní provozní teplotu a zároveň výrazně přispívají k bezpečnosti zařízení. [4]

Další výhodou PTC technologie je její vysoká energetická účinnost. Prvek odebírá maximální výkon pouze při zapnutí, kdy je potřeba rychlého ohřevu. S dosažením cílové teploty se elektrický odpor zvýší, což vede ke snížení proudu a následné minimalizaci spotřeby energie. Tento způsob provozu zároveň prodlužuje životnost zařízení a snižuje nároky na údržbu. [4]

Na rozdíl od tradičních odporových topidel, která zpravidla vyžadují kombinaci s externím termostatem a kalibrací, mohou PTC prvky fungovat samostatně. Tím se zjednodušuje konstrukce i obsluha a zvyšuje spolehlivost v dlouhodobém provozu. [4]

1.5 Měření teploty

Měření teploty představuje jednu ze základních úloh technické praxe i laboratorních aplikací. V současnosti existuje celá řada senzorů, které umožňují snímání teploty na základě různých fyzikálních principů. Přestože konkrétní typy senzorů mají různou konstrukci a využívají rozličné materiály, všechny spojuje skutečnost, že využívají teplotní závislosti elektrických vlastností, především elektrického odporu. [5]

1.5.1 Odporová teplotní čidla

Odporová čidla patří mezi nejspolehlivější senzory pro měření teploty v technické praxi. Jejich princip je založen na měření změny elektrického odporu materiálu v závislosti na teplotě. Tento odpor roste (nebo klesá) s rostoucí teplotou, přičemž závislost bývá pro určité materiály téměř lineární v širokém rozsahu. [6][5]

Nejrozšířenější typy jsou senzory Pt100 a Pt1000, které mají při referenční teplotě 0 °C odpor 100Ω, respektive 1000Ω. Využívaný teplotní koeficient odporu činí u platiny zpravidla $3,85 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ v rozsahu 0-100 °C. Pro širší rozsahy až do 850 °C se používá hodnota $3,91 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Niklové senzory, jako například Ni100, nabízejí vyšší citlivost $5,49 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, avšak jejich teplotní rozsah je omezený a nelinearita vyšší. Tyto senzory se běžně používají v rozsahu od -60 °C do 250 °C. [6]

Z hlediska konstrukce mohou být čidla realizována buď jako drátová, nebo tenkovrstvá. Drátová čidla využívají vodiče o průměru 0,05 až 0,3 mm navinuté na keramická tělíska, přičemž se často používá bifilární vinutí, které minimalizuje indukční vlivy a činí čidlo vhodným i pro střídavé aplikace. Tenkovrstvá čidla se proti tomu vyrábějí napařováním vrstvy citlivého kovu o tloušťce 1-2 μm na nosný substrát, a následně se opatrují ochranným krytím. [5]

Pro vyhodnocení odporových teploměrů se v praxi využívají různé měřící metody. Základní Ohmova metoda umožňuje přímé čtyřsvorkové měření odporu, čímž eliminuje vliv odporu přívodních vodičů. Pokročilejší varianty využívají Wheatstoneův můstek. Případně jeho rozvážené nebo linearizované verze. Moderní systémy s analogově-digitálním převodníkem

často využívají referenční rezistor, přičemž obvody řešení umožňuje přesné měření i s jedinou precizní součástí. [6]

Odporová teplotní čidla, a zejména platinové typy, jsou dnes standardem pro přesné měření teploty v laboratorních, průmyslových i elektronických aplikacích. [6][5]

1.5.2 Termoelektrické senzory

Termoelektrické senzory představují rozšířenou technologii měření teploty, založenou na Seebeckově jevu. Ten spořívá v generování elektrického napětí v uzavřeném obvodu tvořeném dvěma různými vodiči, jejichž spoje se nacházejí na různých teplotách. Vznikající napětí je přímo úměrné rozdílu teplot mezi těmito spoji a závisí na rozdílovém termoelektrickém koeficientu příslušné dvojici kovů. [6]

V praxi se nejčastěji používají standardizované dvojce kovů, označené písmeny např. K, J, T, N, pro které americký Národní institut pro standardy a technologie poskytuje tabelované kalibrační hodnoty v souladu s mezinárodní teplotní stupnicí ITS-90. Kvůli nelinearitě napěťové odezvy je závislost termoelektrického napětí na teplotě obvykle vyjádřena polynomy vyšších řádů. [6]

Pro přesné měření teploty je nutné znát také teplotu tzv. studeného konce, tedy teplotu svorek, mezi nimiž se napětí měří. V moderní praxi se tato teplota kompenzuje buď pomocí izotermální svorkovnice, nebo elektronicky pomocí integrovaných obvodů, které obsahují teplotní čidlo pro měření okolní teploty svorek. [6]

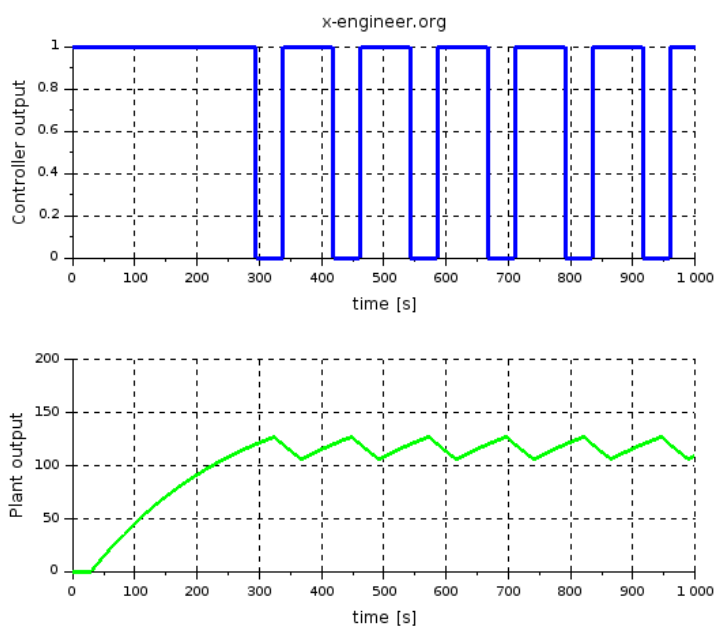
Mezi výhody termočlánků patří široký měřicí rozsah (v závislosti na typu až přes 1000 °C), robustnost, jednoduchost konstrukce a schopnost pracovat v náročných podmínkách. Výstupní signál termočlánku je malé napětí v řádu milivoltů, což vyžaduje citlivé a stabilní vyhodnocovací obvody. [6]

Vedle klasických kovových termočlánků existují také polovodičové senzory, například senzory na bázi křemíku. Tyto senzory využívají specifického uspořádání difuzních oblastí a geometrie přechodů na křemíkové destičce k měření odporu, jenž závisí na teplotě. Přestože nejsou klasickými termočlánky, jejich konstrukční princip je zajímavý a může najít uplatnění v aplikacích s požadavkem na miniaturní rozměry. [5]

1.6 Možnosti regulace

On/Off regulace

Jedná se o dvoustavovou regulaci, což je nejjednodušší formou řídicího systému, jenž přepíná mezi dvěma stavy: zapnuto (On) a vypnuto (Off). Tento typ regulace se používá pro udržení veličiny, kterými jsou například teplota nebo tlak. Princip funkce regulace je následující: Snímač měří aktuální hodnotu kontrolované veličiny, jenž je vyhodnocena regulátorem, který porovnává naměřenou hodnotu s nastavenou hodnotou na základě rozdílu chyby. Pokud je chyba kladná, regulátor sepne. Naopak je-li chyba záporná či nulová, regulátor vypne. Nevýhodou této regulace je nedokonalost výsledné křivky, která osciluje okolo nastavené hodnoty (Obrázek 1 - On/Off regulace). Proto se nehodí pro regulaci, kde je vyžadována vyšší přesnost. [7]



Obrázek 1 - On/Off regulace [7]

PID regulace

PID regulátor představuje klíčový nástroj v oblasti automatického řízení, který je široce využíván v průmyslové automatizaci pro regulaci různých procesních veličin, jako jsou teplota, tlak nebo rychlost. Základním principem funkce PID regulátoru je zpracování rozdílu mezi požadovanou hodnotou a aktuální hodnotou řízené veličiny. Tento rozdíl je vyhodnocován a na jeho základě je upravován výstupní signál, který ovlivňuje samotný řízený proces. [8]

Regulátor se skládá ze tří základních složek: P – proporcionální, I – integrační a D – derivační. Proporcionální složka zajišťuje reakci úměrnou okamžité hodnotě chyby, což poskytuje přímou korelaci. Integrační složka zohledňuje kumulaci chyby v čase a slouží k eliminaci trvalé regulační odchylky. Derivační složka pak reaguje na rychlost změny chyby a jejím prostřednictvím lze tlumit oscilace a zlepšit stabilitu systému. [8]

Matematicky lze výstup PID regulátoru vyjádřit následujícím vztahem:

$$u(t) = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.1)$$

kde $u(t)$ – výstup regulátoru

r_0 – zesílení regulátoru (proporcionální konstanta)

$e(t)$ – regulační odchylka

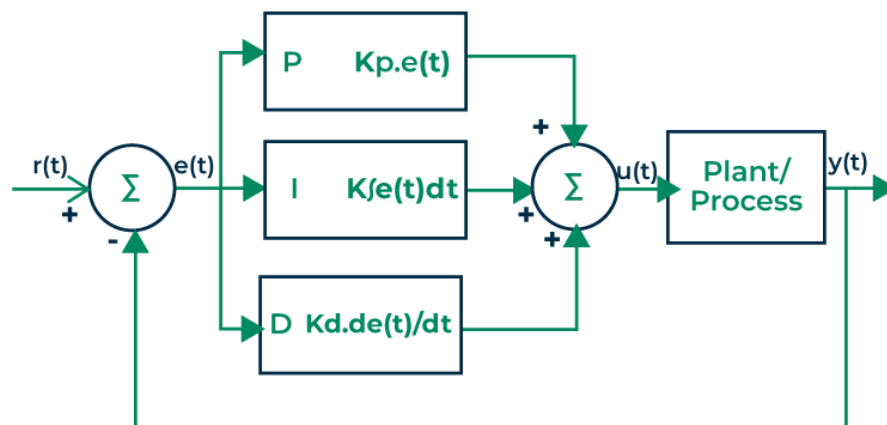
T_i – integrační časová konstanta

$\int_0^t e(\tau) d\tau$ – Integrační složka

T_d – Derivační časová konstanta

$\frac{de(t)}{dt}$ – Derivační složka

Funkční strukturu PID regulace lze ilustrovat blokovým schématem (obrázek 2), ve kterém je patrné, jak se jednotlivé složky podílejí na výpočtu výstupního signálu. [8]



Obrázek 2 - Blokové schéma PID regulace [8]

Účinnost PID regulátoru je závislá na správném nastavení jeho parametrů, což se označuje jako ladění. Tento proces je nezbytný pro optimalizaci výkonnosti systému a obvykle vyžaduje buď empirický přístup, nebo využití metod jako je Ziegler-Nicholsova technika.

Mezi hlavní výhody PID regulace patří jednoduchost implementace, schopnost eliminovat trvalé odchylky a zlepšení dynamické odezvy. Nevýhodou může být citlivost na měřicí šum, zejména v derivační složce, a náročnost správného naladění pro specifický systém. [8]

Celkově lze PID regulaci chápat jako robustní a univerzální řešení pro širokou škálu řídicích úloh. Její efektivní aplikace však vyžaduje důkladné porozumění jednotlivým složkám regulace i charakteristikám řízení procesu. [8]

Ziegler-Nicholsova metoda ladění PID regulátoru

Ziegler-Nicholsova metoda je jednoduchá experimentální metoda sice patřící ke klasickým metodám, ale její zmodernizovaná verze s relé ve zpětné vazbě je často používána i ve složitějších metodách, např. při decentralizovaném řízení více rozměrových soustav. Ve čtyřicátých letech dvacátého století navrhli Zieglerem a Nicholsem na základě experimentů doporučení pro nastavení konstant PID regulátoru. Metoda byla navržena buď pro vyhodnocení přechodové charakteristiky, nebo pro měření meze stability. Druhý způsob spočíval v rozkmitání soustavy vhodně nastaveným P regulátorem. Zesílení regulátoru se postupně zvětšuje, až se obvod dostane na mez stability, tj. regulovaná veličina kmitá s konstantní amplitudou. Takto nalezené zesílení se nazývá kritické (r_{0k}) a současně se odečte kritická perioda kmitů (T_k). Pro nastavení PI a PID regulátoru byly doporučeny následující empirické vztahy: [9]

$$\begin{array}{ll}
 \text{PID:} & \begin{array}{l} r_0 = 0,6 r_{0k} \\ T_i = 0,5 T_k \\ T_d = 0,125 T_k \end{array} & \text{PI:} & \begin{array}{l} r_0 = 0,45 r_{0k} \\ T_i = 0,85 T_k \end{array} & (1.2)
 \end{array}$$

Nevýhodou Ziegler-Nicholsovy metody je, že regulační pochody mají větší překmity. Proto byly původní vztahy (1.2) na základě simulačních experimentů upraveny. Pro posouzení vhodnosti metody pro regulaci se zavádí normalizované zesílení (κ), což je poměr zesílení soustavy na kritické frekvenci ke zesílení na nulové frekvenci: [9]

$$\kappa = \frac{|G(j\omega_2)|}{|G(0)|} \quad (1.3)$$

kde $G(j\omega_2)$ je hodnota přenosové funkce soustavy při kritické frekvenci
 $G(0)$ je hodnota přenosové funkce soustavy při nulové frekvenci

Normalizované zesílení může sloužit i pro posouzení, zdali bude soustava dobře regulovatelná, což platí pro $\kappa < 0,4$. [9]

Adaptivní řízení

V mnoha případech je nutné řídit soustavu za různých pracovních podmínek, kdy se vlastnosti soustavy mění a pevně nastavený regulátor nemusí ve všech situacích vyhovovat. Adaptivní řízení řeší tento problém tím, že umožňuje regulátoru přizpůsobit se aktuálním podmínkám soustavy. Tento postup se označuje jako adaptace. [9]

Existuje několik přístupů k realizaci adaptivního řízení. První základní dělení metod rozlišuje adaptivní systémy a učící se systémy. Adaptivní systémy neustále opakují svůj algoritmus, a to i v případě, že se situace nemění. Naproti tomu učící se systémy si předchozí kroky pamatují a při opakování stejné situace využívají již dříve získané řešení. Další možné dělení je na jednorázové a průběžné adaptivní systémy. Jednorázové adaptivní systémy se běžně využívají v komerčních PID regulátorech, kde se na požádání obsluhy automaticky nastaví regulátor podle jednoduché metody, například pomocí reléové zpětné vazby nebo vyhodnocení přechodové charakteristiky. Tento přístup se označuje jako auto-tuning. Průběžné adaptivní řízení pak znamená, že se adaptace provádí v neomezeném čase, tedy regulátor se neustále přizpůsobuje změnám v soustavě. Nejčastěji používané jsou systémy s referenčním modelem (MRAS) a samočinně se nastavující regulátory (STC). [9]

Adaptivní systémy s referenčním modelem (MRAS – Model Reference Adaptive Systems)

Tento přístup využívá referenční model, který popisuje požadované chování uzavřeného regulačního obvodu. Cílem adaptace je zajistit, aby se soustava co nejvíce chovala podle tohoto modelu. Toho lze dosáhnout buď změnou parametrů regulátoru (parametrické nastavení), nebo úpravou vstupního signálu (signálové nastavení). Tato metoda se často využívá v řízení dopravních prostředků, například autopilotů nebo simulátorů. [9]

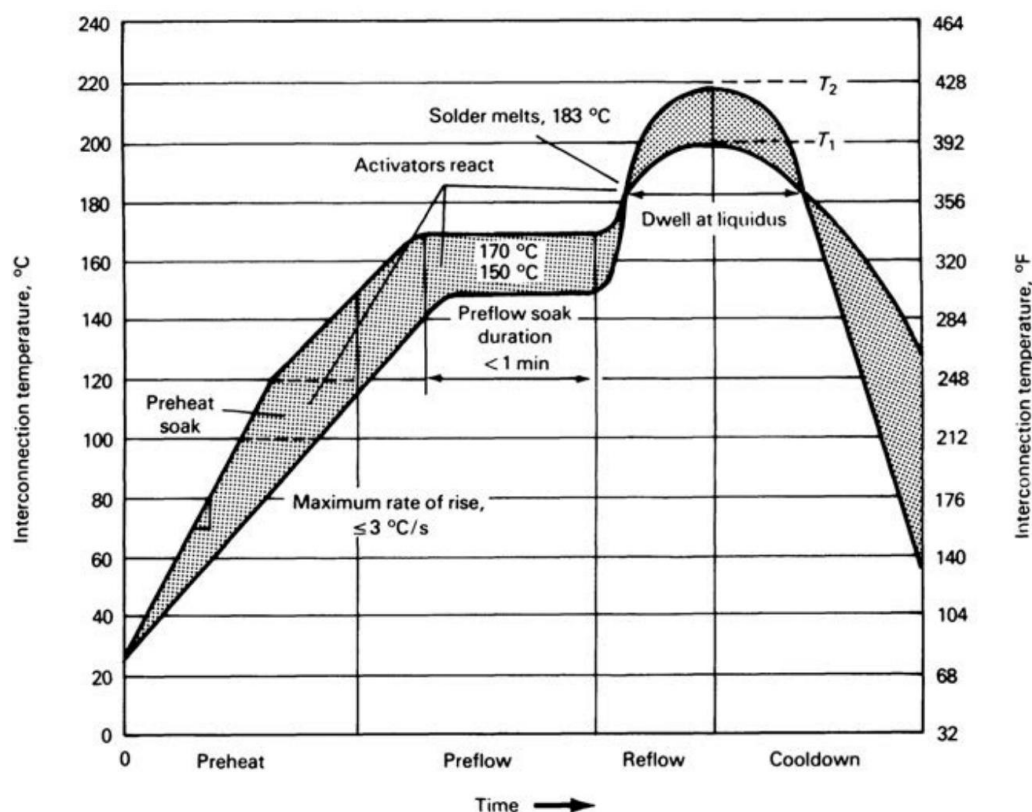
Samočinně se nastavující regulátory (STC – Self-Tuning Controllers)

Tyto regulátory v každém kroku provádějí identifikaci soustavy a na základě takto získaného modelu navrhnou parametry regulátoru. Tento postup, označovaný jako separace identifikace a řízení, má nevýhodu v tom, že pro správnou identifikaci je nutné soustavu vybudit – tedy akční signál by se měl co nejvíce měnit. To však může být v rozporu s požadavkem na

stabilitu regulované soustavy, která má akční signál spíše tlumit. Proto je nutné v řídicím algoritmu ošetřit situace, kdy je soustava po delší dobu v klidu. [9]

1.7 Teplotní profily a jejich části

Pájení technologií reflow je proces pro připájení SMT součástek na DPS přetavením pájecí pasty, jenž je nanese na konkrétní místa (plošky) na DPS. Proces reflow lze rozdělit do několika klíčových fází, z nichž každý přispívá k vytvoření spolehlivých pájených spojů. [10]



Obrázek 3 - Teplotní profil reflow [1]

Předehřev (Preheat)

Při začátku pájení je důležité pomalé zahřívání. Teploty se zvýší přibližně na 100 až 120 °C, aby se snížilo riziko tepelného šoku součástek a delaminaci DPS. Nejkritičtější faktor v předhřívací fázi je řízení rychlosti ohřevu. Mnoho výrobců součástek doporučuje nepřesahovat rychlost 4 °C/s. Tato rychlost by měla být stanovena na základě konkrétní aplikace a typu použitých součástek. Během fáze předehřevu začínají aktivátory působit a některá rozpouštědla se začínají odpařovat. U některých typů pájecích past může v této fázi docházet k redukci oxidů působením aktivačních složek tavidla. [1]

Předtavení /Namáčení (Preflow/Soke)

Před dosažením přetavovací fáze je potřeba po nějakou dobu udržovat teplotu v takzvané předtavovací fázi. Ta zajistí rovnoměrné rozvedení teploty po celé DPS, aby došlo k snížení teplotních rozdílů na jednotlivých částech DPS. Zároveň se odstraní zbytková rozpouštědla obsažená v pájecí pastě. Při dosažení teplot těsně pod bod přetavení, aktivátory tavidla reagují s povrchem DPS a čistí její pájecí plošky a kontaktní plošky součástek. [1]

Přetavení (Reflow)

Jakmile teplota pájecí pasty překročí bod tavení a přejde do roztaveného stavu, tak začíná fáze přetavení. Během této fáze dosáhnou všechny pájitelné části pozorovatelných teplot. Většina výrobců pájek doporučuje zvýšit teplotu přibližně o 15 až 30 °C nad bod tavení, aby došlo k úplnému roztavení a usnadnění tvorby spojů. Doba, po kterou pájitelný spoj zůstane nad bodem tavení pájecí pasty, se nazývá doba setrvání v kapalně fázi. Tato fáze přetavení se rozšiřuje i do části ochlazování, dokud pájka nedosáhne pevného stavu. Jde o nejkritičtější část přetavovacího profilu, protože se jedná o nejvyšší teploty, kterým je DPS vystavena, je nutné minimalizovat dobu jejich působení. [1]

Ochlazování (Cooldown)

Jakmile DPS překročí svou maximální teplotu, začne fáze ochlazování, kdy postupným klesáním teploty pájka ztuhne. Aby se předešlo tepelnému šoku součástek, doporučuje se, aby rychlost chlazení nepřesáhla -4 °C/s. Nicméně rychlé chlazení přispívá k pevnějšímu propojení. [1]

1.8 Odhad topného výkonu zařízení

Při návrhu ohřevného zařízení je klíčovým parametrem stanovení potřebného topného výkonu, který zajistí požadovaný teplotní nárůst za daný čas. Základním fyzikálním principem, na němž je výpočet založen, je první zákon termodynamiky, který vyjadřuje vztah mezi přesným teplem Q , změnou vnitřní energie ΔE_{int} a vykonanou prací W . V kontextu zahřívání tělesa bez mechanické práce platí zjednodušený vztah: [11]

$$Q = mc\Delta T \tag{1.4}$$

Kde:

- Q je množství tepla
- m je hmotnost tělesa

- c je měrná tepelná kapacita
- ΔT je požadovaný nárůst teploty

Tato rovnice představuje základní nástroj pro odhad potřebného výkonu ohřivaného prvku, přičemž skutečný výkon P lze stanovit jako: [11]

$$P = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{mc\Delta T}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Například pro ohřev hliníkové destičky o rozměrech 110 mm x 80 mm x 4 mm o 200 °C ($\Delta T = 200$ K) za 3 minuty ($\Delta t = 180$ s) s měrnou kapacitou hliníku $c = 896$ J/kg*K vychází potřebný výkon:

$$P = \frac{0,095 * 896 * 200}{180} \approx 95 \text{ W}$$

Z toho vyplývá, že k ohřevu takového tělesa za daných podmínek postačí topné těleso s příkonem přibližně 95 W. [11]

2 Praktická část

Návrh samostatné pájecí desky začal výběrem a konstrukcí topného tělesa. Prvním krokem bylo zvolit vhodný materiál pro kontaktní (kovovou) desku, která bude zajišťovat efektivní přenos tepla na desku plošných spojů. Klíčovým parametrem při tomto rozhodování byla nejen tepelná vodivost materiálu, ale také jeho dostupnost a zpracovatelnost.

Důležitou roli hrál rovněž rozměr topné plochy. Cílem bylo, aby zařízení nebylo zbytečně objemné, ale zároveň umožňovalo pohodlnou práci na menších projektech. Na základě těchto požadavků byl zvolen rozměr 110 mm × 80 mm, který představuje kompromis mezi kompaktností a dostatečnou pracovní plochou.

Pro konstrukci topného tělesa byla nakonec vybrána hliníková deska, která nabízí dobré tepelné vlastnosti, nízkou hmotnost a snadné obrábění. Tento materiál byl vhodný pro dosažení rovnoměrného rozvedení teploty po celé pracovní ploše zařízení.

2.1 Výběr topného tělesa

Při návrhu topné části zařízení bylo nutné vybrat vhodnou technologii ohřevu. K dispozici bylo několik možností: odporový drát, topné spirály a keramická topná tělesa. Cílem bylo vytvořit společně s kontaktní plochou tenkou konstrukci, vhodnou pro rovnoměrné zahrávání desky plošných spojů.

Topné spirály byly vyřazeny především kvůli vyšší pořizovací ceně. Zpočátku se jevila jako výhodná volba použití odporového drátu, avšak vzhledem k nutnosti zajistit jeho pevné uchycení k hliníkové základně a problémům s rovnoměrným přenosem tepla byla tato varianta zamítnuta. Jedním z řešení by bylo vytvoření malé uzavřené hliníkové krabičky, kde by byl drát namotán, avšak taková konstrukce by byla objemnější.

Z těchto důvodů bylo nakonec zvoleno keramické topné těleso typu PTC. Tato tělesa jsou cenově dostupnější, vyrábějí se již integrovaná v hliníkových pouzdrech což umožňuje jednodušší montáž ke kontaktní desce. Důležitým faktorem při rozhodování byla také bezpečnostní charakteristika PTC technologie, která díky svému samoregulačnímu efektu znemožňuje přehřátí nad definovanou maximální teplotu.

Vybraná tělesa pracují při napětí 220 VAC a jejich maximální pracovní teplota dosahuje přibližně 270 °C. Výkon jednoho tělese se pohybuje v rozmezí 70-180 W v závislosti na

aktuální teplotě, přičemž s rostoucí teplotou dochází k poklesu výkonu díky vzrůstajícímu elektrickému odporu.

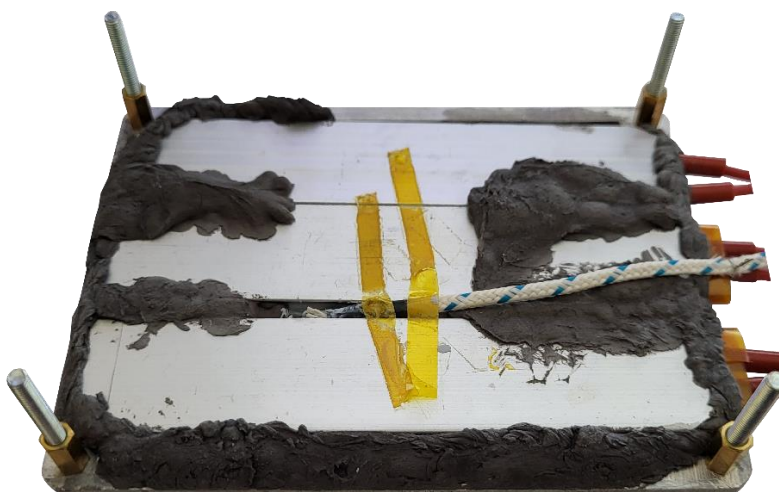
2.2 Konstrukce topného bloku

Pro potřeby zařízení byla zvolena trojice PTC těles. Minimální požadovaný výkon pro dosažení definovaného teplotního profilu byl přitom spočítán na hodnotu přibližně 95 W. Je však třeba vzít v úvahu také tepelný odpor pájené desky, který ovlivňuje účinnost přenosu tepla z topného bloku na cílové místo. S ohledem na tuto skutečnost byla zvolena výkonová rezerva, a výsledná konfigurace tak bezpečně zajišťuje dostatečný ohřev i při zhoršených podmínkách přenosu tepla.

Pro zajištění efektivního přenosu tepla mezi topnými tělesy a hliníkovou kontaktní deskou byla aplikována teplo vodivá pasta s maximální přípustnou provozní teplotou 300 °C, což je dostatečné pro předpokládané podmínky použití. Teplo vodivá pasta minimalizuje tepelné přechodové odpory a tím zlepšuje přenos teploty na kontaktní ploše.

Při návrhu mechanického uchycení topných těles bylo zvažováno několik variant. Možnosti, jako je mechanická fixace pomocí šroubů či nýtů byly zamítnuty kvůli požadavku na zachování rovnosti kontaktní plochy. Jedním z uvažovaných řešení bylo také vytvoření konstrukce typu „sendvič“, kde by byla topná tělesa sevřena mezi dvě hliníkové destičky. Tato varianta však nebyla provedena z důvodu zvýšení tepelné setrvačnosti celého bloku v důsledku přídavného materiálu. Další teoretickou možností bylo bodové přivaření těles k hliníkové desce, nicméně tato technologie nebyla v rámci dostupných prostředků realizovatelná.

Nakonec byla zvolena metoda uchycení pomocí teplovzdušného silikonu, který umožnil jednoduché a dostatečně pevné přichycení těles k hliníkové kontaktní destičce při zachování požadovaných mechanických a tepelných vlastností. Topný blok je zachycen na obrázku 4.



Obrázek 4 - Topný blok (vlastní zpracování)

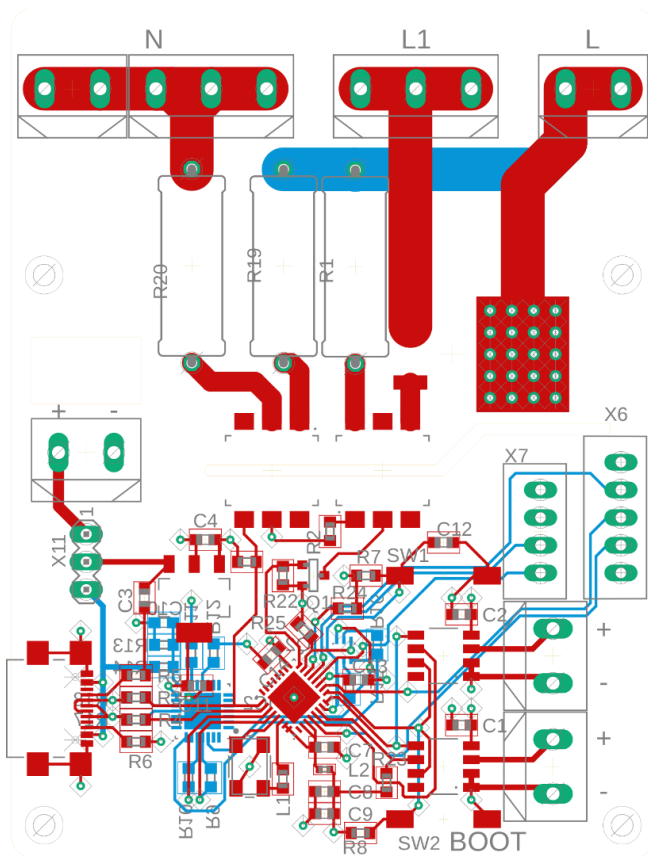
2.3 Návrh desky plošných spojů

Po konstrukci topného tělesa následoval návrh desky plošných spojů, která zajišťuje veškeré řídicí a měřicí funkce zařízení. Hlavním cílem návrhu bylo minimalizovat rozměry desky tak, aby celková konstrukce zařízení zůstala kompaktní.

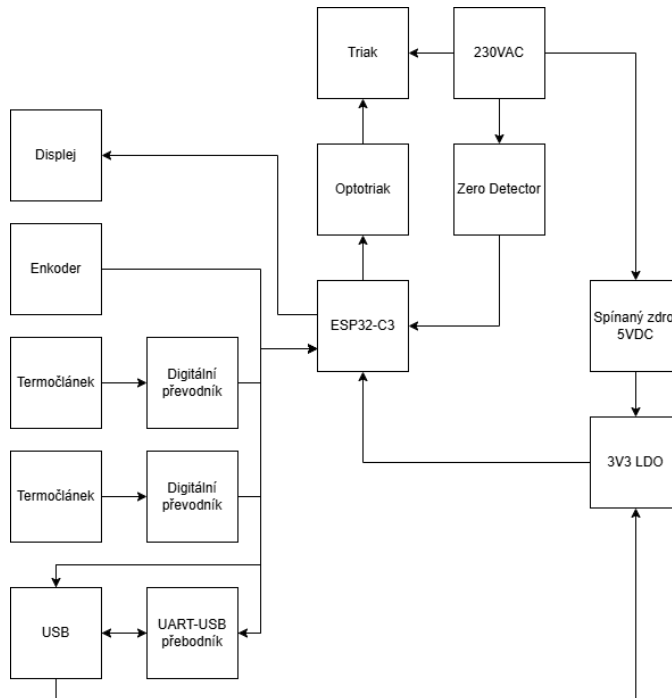
Byla zvolena čtyřvrstvá deska, kde první a čtvrtá vrstva slouží jako signálové vrstvy pro vedení logických signálů. Druhá a třetí vrstva byly vyhrazeny pro napájení, což umožňuje snížit šum a zlepšit elektromagnetickou kompatibilitu celého zařízení.

Vzhledem k přítomnosti síťového napájení 230 VAC bylo nezbytné věnovat pozornost oddělení vysokonapěťových a nízkonapěťových částí na desce, a to jak návrhem rozvržení vodičů, tak použitím vhodných izolačních mezer.

Na desku plošných spojů bylo osazeno 63 součástek, mezi nimiž se nachází mikroprocesor ESP32-C3, triak, optočleny MOC3020 a H11AA1M, dva digitální převodníky MAX6675 pro termočlánky a UART–USB převodník CP2102N. Tyto komponenty společně tvoří funkční celek, který umožňuje přesné řízení ohřevu. Návrh desky plošných spojů je zobrazen na obrázku 5. Obrázek 6 zobrazuje blokové schéma zařízení.



Obrázek 5 - Deska plošných spojů (vlastní zpracování)



Obrázek 6 - Blokové schéma zařízení (vlastní zpracování)

2.3.1 Spínání topného bloku

Pro spínání topného bloku ze sítě bylo nutné zvolit výkonovou součástku schopnou spínat napětí 230 VAC při minimálním provozním proudu 3 ampéry. S ohledem na požadovanou spolehlivost a jednoduchost řízení byl použit triak, který je galvanicky oddělen od řídicí části pomocí optotriaku MOC3020. Toto řešení zahrnuje bezpečný přenos řídicích signálů bez přímého elektrického propojení mezi logickou a silovou částí, čímž se výrazně snižuje riziko poškození mikroprocesoru a dalších nízkonapěťových součástí. Zvolený optotriak navíc umožňuje snadné propojení s digitálním výstupem mikroprocesoru a poskytuje rychlou, bezkontaktní a spolehlivou odezvu při spínání zátěže.

Pro správnou funkci řízení výkonu byl systém doplněn o detekci průchodu nulou, která je nezbytná s ohledem na vlastnosti samotného triaku. Triak se totiž vypíná pouze v okamžiku, kdy proud klesne pod určitou minimální hodnotu, což přirozeně nastává při průchodu střídavého napětí nulou. Pro detekci tohoto okamžiku byl použit optočlen H11AA1M, obsahující dvojici antiparalelně zapojených LED diod a fototranzistor. Tento obvod umožňuje mikroprocesoru přesně identifikovat okamžik nulového průchodu napětí, což je zásadní pro časové řízení sepnutí triaku. Díky tomu lze realizovat jemnou regulaci výkonu pomocí fázového řízení, které je přesně synchronizováno s průběhem síťového napětí.

2.3.2 Měření teploty

Pro účely teplotní regulace byly zvoleny dva termočlánky typu K, které umožňují spolehlivé měření vysokých teplot. V tomto zařízení slouží jeden termočlánek pro měření teploty přímo na topném bloku, zatímco druhý je volně polohovatelný uživatelem, a umožňuje tak přímý kontakt s pájenou stranou desky plošných spojů.

Termoelektrické napětí generované termočlánky je převáděno pomocí dvojice převodníků MAX6675, které zajišťují digitální výstup dat s rozlišením 0,25 °C v rozsahu 0–1024 °C. Tyto obvody zároveň integrují kompenzaci studeného spoje, čímž eliminují nutnost externího měření okolní teploty svorky. Komunikace s řídicí elektronikou je realizována prostřednictvím standardního sériového rozhraní SPI.

2.3.3 Ovládací prvky

Pro zajištění jednoduchého a přehledného ovládní zařízení byl zvolen monochromatický OLED displej s rozhraním I²C. Uživatelský vstup je realizován pomocí inkrementálního otočného enkodéru s integrovaným tlačítkem. Ovládní pomocí enkodéru umožňuje intuitivní procházení menu a nastavování parametrů. Kombinace enkodéru a OLED displeje poskytuje intuitivní a jednoduché ovládní.

2.3.4 Mikrokontroler

Jádrem řídicí části zařízení je mikrokontroler ESP32-C3, který poskytuje dostatečný výpočetní výkon i rozhraní pro připojení periferních komponent. Jedná se o jednojádrový 32bitový procesor s maximální taktovací frekvencí 160 MHz a integrovanou pamětí Flash o velikosti 4 MB.

Mikrokontroler byl zvolen především kvůli své podpoře komunikačních sběrnic I²C a SPI, které jsou v zařízení využity pro připojení displeje a termočlávkových převodníků. Dále poskytuje dostatek digitálních výstupů a vstupů pro řízení všech připojených komponent. Mikrokontroler je osazen v pouzdře QFN, což přispívá k celkově kompaktní konstrukci desky plošných spojů.

2.3.5 Ladící rozhraní

Pro účely vývoje a ladění firmware byl na desku integrován převodník UART-USB CP2102N, který umožňuje sériovou komunikaci mezi zařízením a vývojovým počítačem. Toto rozhraní bylo využíváno zejména pro monitorování výstupů, kontrolu inicializace jednotlivých komponent a ověření správné funkce regulační smyčky během testování zařízení.

Přítomnost tohoto prvku není nezbytná pro běžný provoz zařízení. Ve finálním nasazení může být prvek odstraněn či ponechán jako volitelný prvek pro účely diagnostiky.

2.4 Řízení teploty a softwarové řešení

K řízení teploty topného bloku je využit triak spínaný prostřednictvím optotriaku, který zajišťuje galvanické oddělení mezi logickou a silovou částí obvodu. Z hlediska přesnosti regulace bylo nutné implementovat také detekci průchodu nulou síťového napětí. Tato funkce je zajištěna pomocí optočlenu, jenž obsahuje dvojici antiparalelně zapojených LED a fototranzistor. Výstup tohoto optočlenu generuje signál při každém průchodu nulou, čímž umožňuje synchronizaci spínání triaku s napěťovou fází a tím i realizaci cyklového řízení.

Samotné řízení teploty je řešeno softwarově pomocí PID regulace, která umožňuje plynulé a přesné udržování nastavené teploty. Řídicí algoritmus byl implementován v prostředí Arduino frameworku a využívá dostupnou PID knihovnu.

V rámci řízení teplotního profilu je definována posloupnost požadovaných teplotních hodnot v čase. Každých 200 ms je aktualizována cílová hodnota teploty (setpoint), která je porovnávána s aktuální teplotou měřenou termočlánkem. Na základě této odchylky PID regulátor vypočte potřebný výkon.

Výstupní hodnota PID regulátoru je převedena na počet aktivních půlvln, které budou sepnuty během každého síťového cyklu. Metoda cyklového řízení je vhodná zejména pro odporové zátěže, protože minimalizuje rušení na síti a nevyžaduje složitou fázovou detekci. Při každém průchodu nulou dojde ke kontrole, zda má být triak sepnut, a pokud ano, je aktivován krátkým impulzem.

Celý systém zároveň obsahuje ochranný mechanismus, který vypne výstupní výkon v případě překročení definované maximální teploty, čímž je zajištěna bezpečnost provozu zařízení.

2.4.1 Ovládací prvky

Ovládací zařízení je realizováno pomocí vícevrstvého interaktivního menu, které je navrženo jako stavový automat. Tento automat je programově reprezentován pomocí výčtového typu enum, který definuje jednotlivé stavy menu. Zpracování jednotlivých stavů probíhá v hlavní smyčce, kde se podle aktuálního stavu volají příslušné funkce.

```
enum STATE {  
    PROFILES_STATE,  
    CUSTOM_PROFILE_STATE,  
    PREHEAT_PROFILE_STATE,  
    THERMOCOUPLE_STATE,  
    SET_FOR_RUNNING_STATE  
};
```

Obrázek 7 - Stavy uživatelského rozhraní (vlastní zpracování)

Uživatelský vstup je zajištěn prostřednictvím rotačního enkodéru s integrovaným tlačítkem, který slouží k výběru jednotlivých možností. Po spuštění zařízení je uživateli nabídnuta volba jednoho ze čtyř hlavních režimů neboli hlavní menu (obrázek 8).



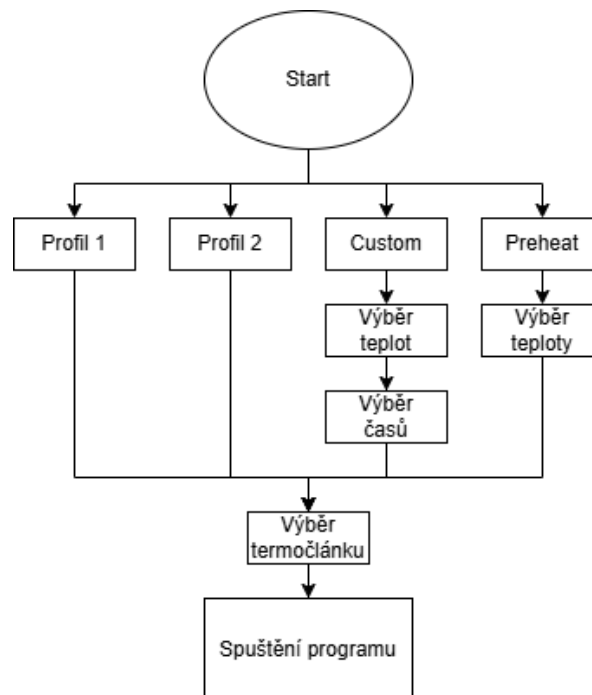
Obrázek 8 - Hlavní menu (vlastní zpracování)

První dva režimy představují pevně definované teplotní profily. Třetí režim umožňuje vytvoření vlastního teplotního profilu zadáním pěti teplotních bodů a odpovídajících časových intervalů. Čtvrtou možností je režim přehřevu, ve kterém uživatel nastaví cílovou teplotu, jež je následně udržována až do manuálního ukončení. Po zvolení požadovaného režimu a případného nastavení parametrů si uživatel zvolí jeden ze dvou dostupných termočlánků (obrázek 9).



Obrázek 9 - Výběr termočlánku (vlastní zpracování)

Poté zařízení přejde na poslední obrazovku, kde čeká na potvrzení spuštění procesu stiskem tlačítka. Struktura ovládacího menu je znázorněna na obrázku 10.



Obrázek 10 - Struktura ovládacího menu (vlastní zpracování)

Pro implementaci displeje byly využity knihovny Adafruit_SSD1306.h a Adafruit_GFX.h, které umožňují zobrazování textových i grafických prvků. Všechny obrazovky menu jsou vykreslovány dynamicky v závislosti na aktuálním stavu automatu.

Tato koncepce poskytuje uživateli jednoduché a přehledné ovládání celého zařízení bez nutnosti použití dalších ovládacích prvků, a zároveň zajišťuje dostatečnou flexibilitu při nastavování parametrů provozu.

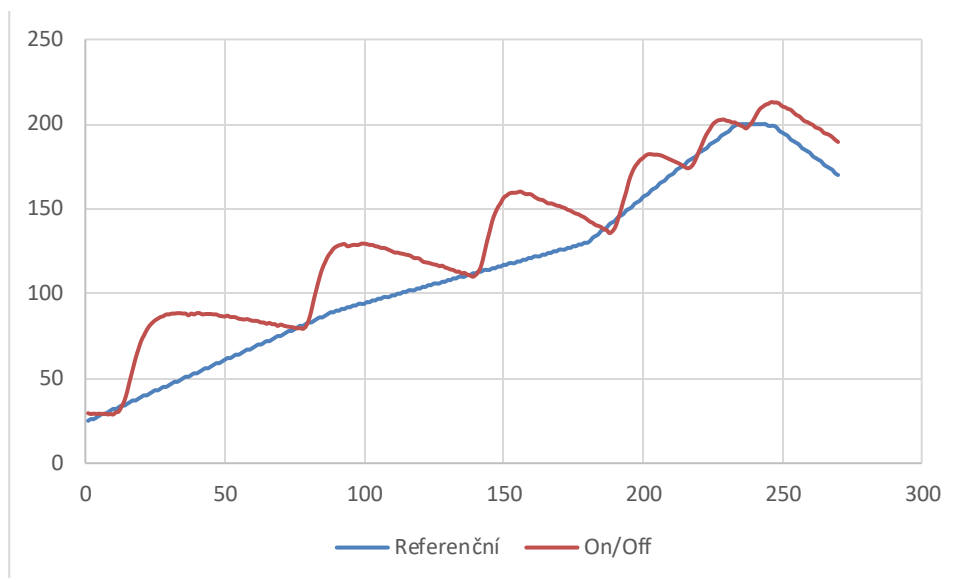
2.5 Realizace prototypu a ověření funkčnosti zařízení

Po dokončení návrhové části následovala realizace prototypu pájecí desky. Pro osazení desky plošných spojů byla použita pájecí pasta, do které byly umístěny všechny SMD součástky, a následně byla celá sestava zapájená v peci. Kritické komponenty, jako je mikrokontroler a USB-UART převodník v pouzdře QFN, byly po osazení zkontrolovány pomocí rentgenu, který potvrdil správné zapájení a přítomnost všech spojů.

Po vizuální a rentgenové kontrole následovalo ověření základních funkčních bloků zařízení. Testována byla komunikace s displejem, čtení hodnot z termočlánků a funkce spínání triaku. Každá z těchto částí byla ověřena samostatně, a po úspěšném testování byla provedena integrace všech částí od jednoho funkčního celku.

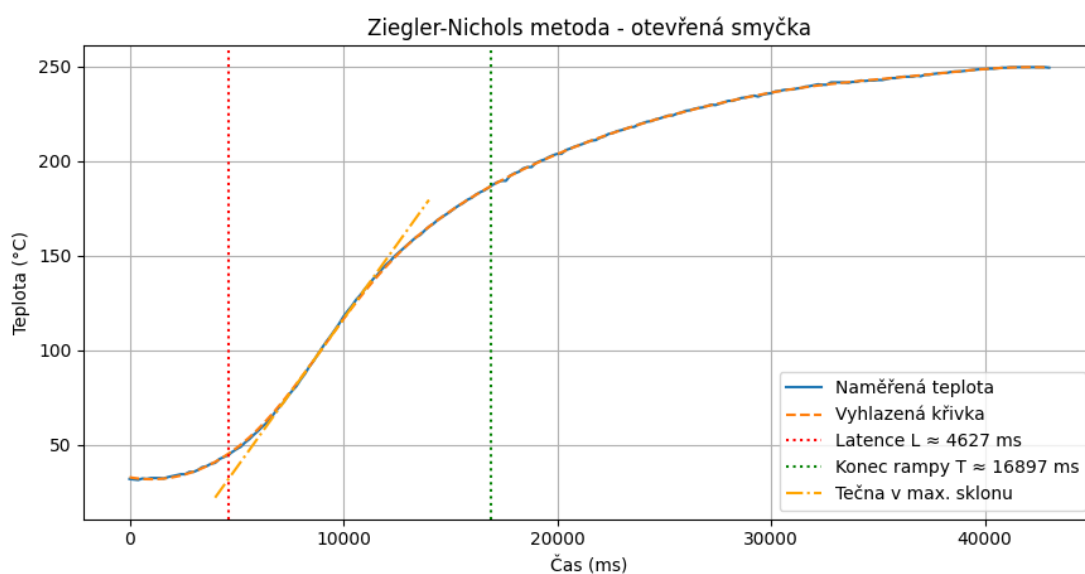
Pro ověření regulace bylo zařízení testováno ve dvou režimech řízení: jednoduché dvoustavové regulaci typu On/Off a PID. V rámci testu byl aplikován teplotní profil s teplotou dosahující 200 °C. V obou režimech byla zaznamenána aktuální teplota a porovnávána s cílovou hodnotou.

Při použití On/Off regulace se očekávaně projevilo chování typické pro dvoustavový systém. Regulace se projevuje jako výrazně kolísavá, systém se přehřeje, následně čeká na ochlazení a znovu sepne. Výsledkem jsou oscilace kolem cílové křivky. Toto chování vede k tomu, že teplotní průběh výrazně nesleduje požadovaný profil. Naměřené hodnoty On/Off regulace a referenční teplotní profil jsou zobrazeny na obrázku 11.



Obrázek 11 - Teplotní křivka On/Off regulace (vlastní zpracování)

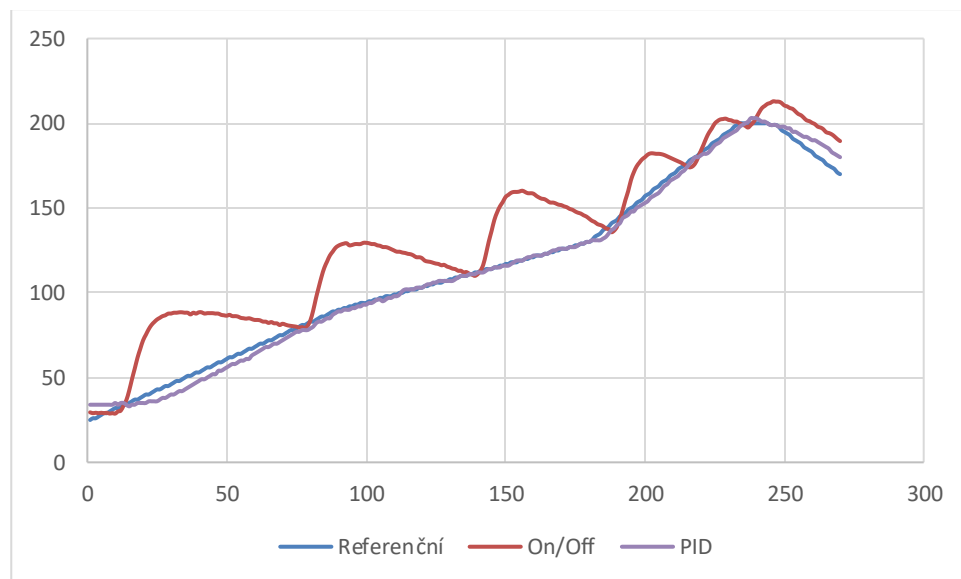
Před použitím PID regulace bylo nejprve třeba určit parametry jednotlivých složek. K tomu byla využita Ziegler-Nicholsova metoda založená na reakční křivce. Ta spočívá v tom, že byl topný blok spuštěn na plný výkon bez zpětné vazby a sledovány dva parametry. Prvním parametrem byla mrtvá doba L , tedy doba od okamžiku zapnutí výstupu do chvíle, kdy se začne projevovat ztatečná změna teploty. Druhým parametrem byla časová konstanta T , která udává, jak rychle systém reaguje – konkrétně dobu mezi začátkem růstu křivky a bodem, kdy odezva dosáhne přibližně 63 % své ustálené hodnoty. Tyto dva parametry pak sloužily jako vstup do empirických vzorců, z nichž lze následně vypočítat konstanty K_p , K_i a K_d podle zvoleného typu regulátoru (P, PI nebo PID). Výsledná křivka je zobrazena na obrázku 12.



Obrázek 12 - Teplotní křivka otevřené smyčky (vlastní zpracování)

| Typ regulátoru | K_p | K_i | K_d | |
|----------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-------|
| P | $K_p = T/L$ | | | (2.1) |
| PI | $K_p = 0.9 \times (T/L)$ | $K_i = K_p/(3.33 \times L)$ | | |
| PID | $K_p = 1.2 \times (T/L)$ | $K_i = K_p/(2 \times L)$ | $K_d = K_p \times (0.5 \times L)$ | |

Při použití PID regulace bylo dosaženo znatelně vyšší přesnosti a plynulosti v řízení teploty. Regulátor průběžně vyhodnocuje rozdíl mezi cílovou a aktuální teplotou a upravuje výkon tak, aby nedocházelo k přehřátí ani k výraznému zaostávání. Ze záznamů je patrné, že PID regulace udržuje teplotu s minimálním překmitem a bez výrazných oscilací. Teplota kopíruje zadaný profil včetně změn sklonu i přechodů mezi jednotlivými fázemi. Základní parametry PID regulátoru byly tedy určeny pomocí Ziegler-Nicholsovy metody. Naměřené časy byly $L \approx 4627$ ms a $T \approx 16897$ ms z čehož byly dopočteny výchozí hodnoty $K_p = 4,38$, $K_i = 0,47$ a $K_d = 10,13$. Tyto počáteční hodnoty byly následně laděny, aby odpovídaly požadovanému teplotnímu profilu. Finální nastavení $K_p = 5,20$, $K_i = 0,60$ a $K_d = 1,50$ poskytuje nejvyváženější poměr mezi rychlostí a stabilitou. Výsledný regulační průběh je uveden na obrázku 13.



Obrázek 13 - Teplotní křivka PID regulace (vlastní zpracování)

Na základě porovnání měřených hodnot lze konstatovat, že PID regulace je výrazně vhodnější pro řízení teploty dle definovaného profilu. Zajišťuje přesnější sledování průběhu, vyšší stabilitu a lepší reakci na změny požadované teploty, což je zvláště důležité u aplikací vyžadujících přesný a reprodukovatelný teplotní režim.

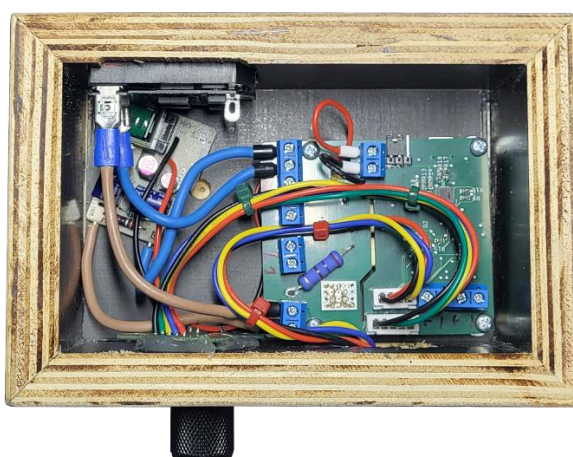
Ověření praktické funkčnosti zařízení bylo završeno reálným testem, během kterého byla na zařízení úspěšně zapájena deska plošných spojů s běžnými SMD komponenty. Pájecí proces proběhl podle definovaného teplotního profilu, přičemž kvalita výsledných spojů odpovídala požadavkům pro sériovou výrobu. Tím byl potvrzeno, že zařízení je nejen funkční, ale plně využitelné i praxi.

Na obrázku 14 a 15 je zachyceno kompletní zhotovení zařízení, včetně topného bloku, desky plošných spojů a ovládací části. Konstrukce je kompaktní a přehledná, přičemž jednotlivé komponenty byly uspořádány s důrazem na bezpečnost, snadnou montáž.

Celkové rozměry zařízení činí 155 mm (šířka) × 70 mm (výška) × 107 mm (hloubka), což představuje prostorově úsporné řešení vhodné i pro omezené pracovní prostředí a přispívá ke snadné manipulaci.



Obrázek 14 - Přední strana zařízení (vlastní zpracování)



Obrázek 15 - Vnitřní část zařízení (vlastní zpracování)

Závěr

Hlavním výsledkem této práce je úspěšný návrh a realizace funkčního zařízení pro pájení SMT součástek metodou reflow. Praktické testování prokázalo, že navržené zařízení efektivně dosahuje požadovaných teplotních profilů, přičemž zejména implementace PID regulátoru výrazně zlepšila přesnost a stabilitu regulace teploty oproti jednodušší dvoustavové metodě.

Výsledné zařízení představuje kompaktní a ekonomický dostupné řešení, které je možné využít v amatérských a prototypových dílnách. Práce prokázala, že správnou volbou topných prvků, materiálů kontaktních desek, a pečlivým návrhem elektroniky lze dosáhnout profesionální úrovně kontroly procesu pájení.

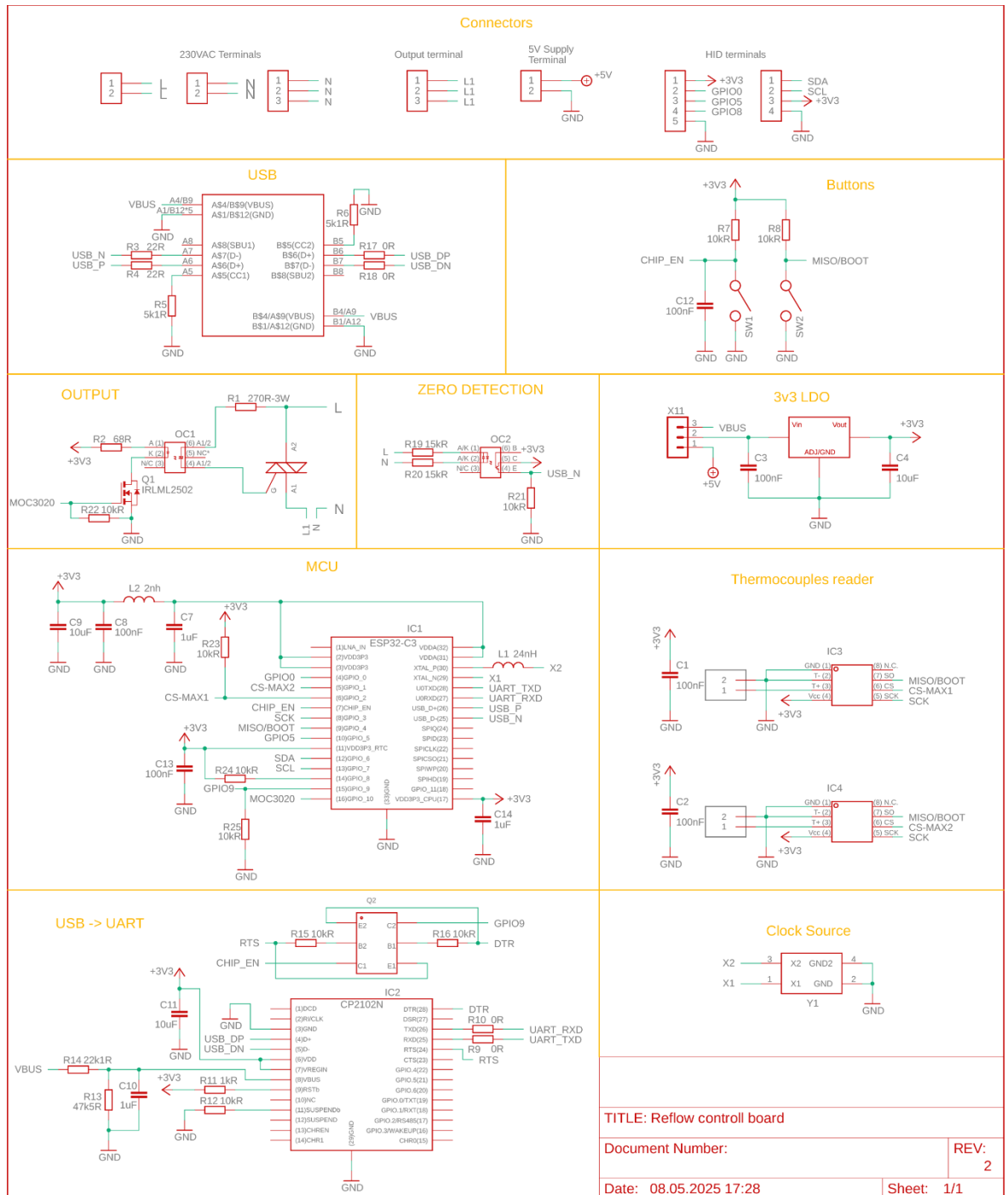
Budoucí vylepšení mohou zahrnovat další rozšiřitelnou funkcionalitu, například vytvoření počítačového programu pro pokročilejší sledování a vyhodnocování procesu pájení, nebo implementaci adaptivních regulačních algoritmů pro ještě přesnější řízení teploty.

3 Literatura

- [1] SCHWARTZ, Mel. *Soldering: Understanding the Basics*. ASM International, 2014. ISBN 978-1-62708-058-3.
- [2] RUŽA, Viliam. *Pájení*. 2. vyd., upr. a dopl. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] DESHMUKH, Yeshvant V. *Industrial Heating: Principles, Techniques, Materials, Applications, and Design*. CRC Press, 2005. ISBN 0-8493-3405-5.
- [4] PAKEPTC. What is a PTC heater, and how does it work? *Pakeptc* [online]. 2024 [cit. 2025-04-12]. Dostupné z: <https://www.pakeptc.com/resources/what-is-a-ptc-heater-and-how-does-it-work.html>
- [5] FROHN, Manfred. *Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.
- [6] HAASZ, Vladimír, Jan HOLUB, Michal JANOŠEK, Petr KAŠPAR a Vojtěch PETRUCHA. *Elektrická měření: přístroje a metody*. 3. přepracované vydání. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2018. ISBN 978-80-01-06412-2.
- [7] X-ENGINEER. On-off control system. *X-Engineer* [online]. c2025 [cit. 2025-03-13]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/on-off-control-system/>
- [8] Proportional Integral Derivative Controller in Control System. *Geeks For Geeks* [online]. 2023, 25.10.2023 [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/proportional-integral-derivative-controller-in-control-system/>
- [9] MACHÁČEK, Jiří. *Pokročilé metody řízení procesů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-937-1.
- [10] HOSSEINI, Mazi. Reflow Soldering in PCBs: How It Ensures Reliable Solder Joints. *Arshon Technology* [online]. 2024, 27.12.2024 [cit. 2025-03-14]. Dostupné z: <https://arshon.com/blog/reflow-soldering-in-pcbs-how-it-ensures-reliable-solder-joints/>
- [11] WALKER, Jearl, David HALLIDAY a Robert RESNICK. *Fundamentals of physics*. 9th ed., extended. Hoboken: Wiley, c2011. ISBN 978-0-470-46908-8.

4 Přílohy

Příloha A – Schéma zařízení



Příloha B – CD

Návrh DPS

Zdrojový kód