

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Pájecí stanice
Martin Hrodek

Bakalářská práce
2025

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Martin Hrodek**
Osobní číslo: **I22055**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Pájecí stanice**
Zadávající katedra: **Katedra elektroniky a rádiových systémů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je návrh pájecí stanice (zdroje) využívající průmyslový hrot. Kvalitní pájecí stanice se cenově pohybují řádově v desítkách tisíc korun a skládají se ze základové stanice (drahá část) a pájecího pera (relativně levná část), které v sobě ukrývá značné know-how jako hroty JBC s výkonem ke 100W přímo v hrotu (namísto rukojeti jako u levných pájek). Nabízí se tedy možnost postavit vlastní zdroj s měřením a regulací teploty pro tyto hroty. Teoretická část práce provede rešerši typů pájek (hrotů), způsoby jejich ohřevu, umístění a způsobu měření teploty. Dále provede rozbor možností připojení a zpracování signálu ze senzoru teploty a možnosti řízení výkonu na hrotu pájky (PWM na DC napájení, tyristorové řízení na AC...). Praktická část ověří možnosti měření teploty a řízení výkonu na zvoleném typu hrotu a následně provede návrh pájecí stanice s vlastní elektronikou.

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 stanice 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 Hrodek

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Pavlu Rozsivalovi, dále rodině a přátelům, jmenovitě Martinu Stárkovi za cenné rady a pomoc při tvorbě této práce a během celého studia a Milošovi Hrodkovi st. za ochotu a pomoc v rámci celého studia.

Anotace

Práce se zabývá návrhem pájecí stanice řízenou mikrokontrolerem. V teoretické části budou rozebrány možnosti napájení pájecího hrotu, regulace a měření teploty. Praktická část se bude zabývat výběrem jednotlivých částí pájecí stanice, návrhem, konstrukcí a tvorbou programu pro řízení výkonu pájecího hrotu.

Klíčová slova

Pájecí stanice, měření teploty, regulace, mikrokontroler, výroba.

Title

Soldering station

Annotation

The thesis deals with the design of a soldering station controlled by a microcontroller. In the theoretical part the possibilities of soldering tip power supply, regulation and temperature measurement will be discussed. The practical part will deal with the selection of individual parts of the soldering station, design, construction and creation of a program for controlling the power of the soldering tip.

Keywords

Soldering station, temperature measurement, regulation, microcontroller, construction.

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1 Pájení	12
1.1 Historie pájení.....	12
1.2 Pájka a druhy pájek.....	12
1.2.1 Měkké pájky cínové.....	13
1.2.2 Měkké pájky speciální.....	13
1.3 Tavidlo a druhy tavidel.....	13
1.4 Pájecí nástroje a rozdělení.....	14
1.4.1 Oblasti použití.....	14
1.4.2 Konstrukce.....	14
1.4.3 Typ napájení.....	14
1.4.4 Princip ohřevu.....	14
2 Mikropájka	14
3 Základová stanice	15
3.1 Druhy napájení pájecích stanic.....	15
3.2 Porovnání výrobců pájecích stanic.....	15
4 Pájecí hrot	16
4.1 Technologie výroby pájecích hrotů.....	16
4.2 Způsob ohřevu hrotu.....	16
4.3 Možnosti napájení hrotu.....	17
4.3.1 Lineární regulace.....	17
4.3.2 Spínané zdroje s PWM regulací.....	18
4.3.3 Triaková regulace střídavého napětí.....	18
5 Regulační algoritmy	19
5.1 Dvoustavová regulace.....	19
5.2 PID regulace.....	20
5.2.1 Základní princip PID regulace.....	20

5.2.2	Funkce jednotlivých složek	20
5.2.3	Použití PID v praxi	20
5.3	Adaptivní regulace	21
6	Způsoby měření teploty hrotu	21
6.1	Kovové odporové senzory teploty	21
6.1.1	Teplotní součinitel	21
6.1.2	Platinové snímače teploty	22
6.1.3	Niklové a měděné snímače teploty	23
6.2	Polovodičové odporové senzory teploty	23
6.2.1	Termistory	23
6.2.2	Polovodičové monokrystalické odporové senzory teploty	23
6.3	Termoelektrické články	24
6.3.1	Seebeckův jev, princip termočlánku	24
6.3.2	Typy termočlánků	24
6.4	Porovnání senzorů pro měření teploty hrotu	26
6.5	Připojení a zpracování signálu ze senzoru teploty	26
6.5.1	Odporové kovové senzory teploty	26
6.5.2	Polovodičové senzory teploty	27
6.5.3	Termoelektrické články	27
7	Požadavky pro návrh pájecí stanice.....	28
8	Napájení pájecí stanice.....	29
9	Výběr hrotu pro pájecí stanici.....	29
9.1	Koncepce pájecího hrotu JBC.....	29
9.2	Druhy pájecích hrotů JBC.....	30
9.3	Zvolený pájecí hrot	31
9.4	Rukojeť pájecího hrotu	31
10	Řídicí systém pájecí stanice.....	32
10.1	Vlastnosti ESP32	32
10.2	Využití ESP32 v pájecí stanici.....	33
11	Měření teploty pájecího hrotu	34
11.1	Měření teploty.....	34
11.2	Použití převodníku pro termočlánek.....	34
11.3	Problematika měření teploty	35

12	Řízení výkonu pájecího hrotu	36
12.1	Spínaný zdroj	36
12.1.1	Vlastnosti a výhody zdroje	37
12.2	Spínací prvek PWM.....	37
12.2.1	Parametry IRLZ44N	38
12.3	Spínání výkonového tranzistoru	38
12.3.1	Použití budiče pro high-side spínání.....	39
13	Zobrazení hodnot	42
13.1	Požadavky na zobrazení hodnot	42
13.2	Zobrazované hodnoty	42
13.3	Typy displejů používané v pájecích stanicích	42
13.4	Volba displeje pro pájecí stanici.....	43
14	Nastavení parametrů	44
14.1	Použití rotačního enkodéru	44
15	Napájení mikrokontroleru a budiče	45
15.1	Větev 5V – napájení logiky	45
15.2	Větev 12V – budič MOSFETu	45
15.3	Větev 3,3V – termočlánek	45
15.4	Zhodnocení napájecího řešení	45
16	Postup konstrukce pájecí stanice	46
17	Návrh obvodu	47
17.1	Napájecí část.....	47
17.2	Výkonová část – řízení ohřevu pájecího hrotu	48
17.3	Řídicí část – zapojení mikrokontroleru a periférií	50
17.3.1	Rotační enkodér – SV1	50
17.3.2	Termočlánekový převodník – MAX31856 – SV2	51
17.3.3	OLED displej – SV3	51
17.3.4	Sleep senzor – STAND pin.....	52
17.3.5	Výstup PWM signálu – řízení výkonu.....	52
18	Návrh DPS	52
19	Návrh a konstrukce krytu	54
20	Popis a funkce programu	55
21	Testování pájecí stanice	57

Závěr	60
Literatura	61
Příloha A – Fotodokumentace pájecí stanice	65
Příloha B – Zdrojový kód.....	66

Seznam zkratek

SMD – Surface Mount Device

RTD – Resistance Temperature Detector

DPS – Deska plošných spojů

PTC – Positive Temperature Coefficient

NTC – Negative Temperature Coefficient

TC – Thermo couple

ADC – analog-to-digital converter

V – Volt

Hz – Hertz

BT – Bluetooth

MCU – Micro Controller Unit

SPI – serial peripheral interface

I²C – Inter-Integrated Circuit

PWM – Pulse Width Modulation

MOSFET - Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Kapilární jevy [36].....	13
Obrázek 2 - Aktivní pájecí hrot [8].....	17
Obrázek 3 - Pasivní pájecí hrot [9]	17
Obrázek 4 - Charakteristiky vybraných TC [21]	25
Obrázek 5 - Wheatstoneův můstek [17]	27
Obrázek 6 - Aktivní pájecí hrot [8].....	29
Obrázek 7 - JBC C470-057 RF shield removal [25]	30
Obrázek 8 - JBC C245-935 Conical bent [25].....	30
Obrázek 9 - JBC C210-020 Conical tip [25]	31
Obrázek 10 - JBC C115-126 Conical tip [25]	31
Obrázek 11 - Rukojeť JBC T245 (bez hrotu) [Foto autor]	32
Obrázek 12 - Blokové schéma ESP32 [27]	33
Obrázek 13 - Modul s obvodem ESP32 [26].....	33
Obrázek 14 - MAX31856 Blokový diagram měření [23].....	34
Obrázek 15 - MAX31856 typické zapojení [23]	35
Obrázek 16 - Graf výstupu TC hrotu [Snímek obrazovky autor]	36
Obrázek 17 - Graf výstupu TC hrotu, rušení [Snímek obrazovky autor]	36
Obrázek 18 - Původní zapojení Low-side spínač [Autor]	39
Obrázek 19 - IR2104 Blokové schéma [30].....	41
Obrázek 20 - IR2104 Typické zapojení [30].....	41
Obrázek 21 - OLED display – SH1106 [31].....	43
Obrázek 22 - Rotační enkodér modul [33]	44
Obrázek 23 - Blokové schéma pájecí stanice [Autor]	46
Obrázek 24 - Schéma napájecí části [Autor]	47
Obrázek 25 – Schéma výkonové části [Autor]	48
Obrázek 26 - Zapojení mikrokontroleru a periférií [Autor]	50
Obrázek 27 – Schéma převodníku MAX31856 [34].....	51
Obrázek 28 - Schéma modulu OLED I2C displej [35].....	52
Obrázek 29 - Horní vrstva DPS [Autor]	53
Obrázek 30 - Spodní vrstva DPS [Autor]	53
Obrázek 31 - Vzhled finální pájecí stanice přední část [Autor]	54
Obrázek 32 - Vzhled finální pájecí stanice zadní část [Autor]	55
Obrázek 33 - Blokový diagram programu [Autor]	56
Obrázek 34 - Čas nahřátí na Stand-by teplotu [Autor]	57
Obrázek 35 - Čas nahřátí na teplotu 300°C [Autor]	58
Obrázek 36 - Ochlazení pájecího hrotu na měděné desce [Autor]	58
Obrázek 37 - Ochlazení pájecího hrotu vlhkou houbičkou [Autor]	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Porovnání cen pájecích stanic	16
Tabulka 2 - Dovolené tolerance dle IEC-751 (0-500 °C) [17].....	22
Tabulka 3 - Základní údaje TC [17]	25
Tabulka 4 - Parametry MeanWell RSP-200-24 [28].....	37

Úvod

I v dnešní době, době úplné automatizace procesu výroby desek plošných spojů a jejich osazování elektronickými součástkami, se hojně využívají ruční pájecí metody. Mezi tyto metody pájení se řadí i pájení pomocí mikropájkky. Pájení mikropájkou se stále využívá v průmyslových velkovýrobách, ale i v osobních a domácích podmínkách pro výrobu nebo opravu elektronických zařízení.

Teoretická část této práce se bude zabývat rozborem pájecích metod a nástrojů, rozborem používaných pájecích hrotů. Dále možnostmi napájení pájecích hrotů a regulace výkonu na topných tělesech hrotů. V teoretické části budou také popsány metody měření teploty a jejich implementace při měření teploty pájecího hrotu.

Praktická část bakalářské práce se bude zabývat požadavky pro návrh pájecí stanice, volbou jednotlivých funkčních částí pájecí stanice. Dále se bude zabývat návrhem schéma zapojení elektronických součástí a následným návrhem desky pro propojení jednotlivých součástek. Součástí návrhu pájecí stanice bude i výroba krycích částí a krabičky finálního produktu. Práce bude obsahovat popis programu řídicí chod celé pájecí stanice.

1 Pájení

Pájení je způsob spojování materiálů za tepla. Rozdíl mezi pájením a svařováním je ten, že při svařování dochází k natavení spojovaných materiálů, obvykle přidáním svařovacího materiálu a tím i jejich spojení. Při pájení jsou materiály pouze nahřáty a spoj je tvořen pájkou, externě dodaným materiálem. Také teploty se liší. Pájení probíhá zpravidla do teplot okolo 450 °C, svařování probíhá za teplot vyšších, teplot tání svařovaného materiálu. [1]

1.1 Historie pájení

Záznamy o pájení jsou již z dob před našim letopočtem, kde tuto metodu využívali starověký Egypťané. Na našem území pájení používali slavní šperkaři Velkomoravské říše v druhé polovině 9. století. Tato metoda spojování má tedy dlouhověkou tradici, avšak největší rozsah se datuje až od roku 1930, kde se pájení využívalo v průmyslové výrobě. [2]

1.2 Pájka a druhy pájek

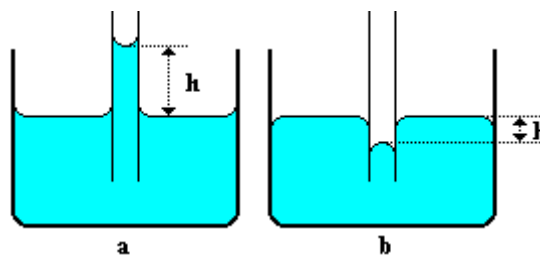
Jak již bylo zmíněno, k pájení je nutná pájka. Pájka je materiál, který je externě dodáván při pájení mezi materiály a vytváří spoj pájených materiálů. Pájka má mít vždy nižší teplotu tání než spojované kovy.

Pájky jsou vyráběny v různých podobách v závislosti na užití pájky. V elektrotechnice se hojně využívá pájky v podobě tenkého drátu s průřezem 0,5mm; 0,7mm; 1 mm; 1,5mm ...

Dále se vyrábí pájky v podobě tenkého trubičkového drátu, jehož výplň je tavidlo. Trubičkové dráty jsou dodávány s obdobnými průřezy, jako u drátových pájek.

Důležité vlastnosti pájky jsou:

- **Smáčivost** je schopnost pájky v tekutém stavu přilnout k povrchu spojovaných materiálů při pracovní teplotě. Na smáčivost má významný vliv povrchové napětí pájky v tekutém stavu. [3]
- **Roztékavost** je schopnost tekuté pájky roztéci se při určité teplotě po vodorovném povrchu pájeného materiálu. [3]
- **Kapilarita** je schopnost pájky v tekutém stavu vyplnit mezeru pájeného spoje působením kapilárních sil[3]



Obrázek 1 - Kapilární jevy [36]

Na obrázku (Obrázek 1) lze sledovat kapilární elevaci (a) a kapilární depresi (b), kde kapilární elevace je při pájení žádaná.

Pájky se dále rozdělují do dvou hlavních skupin:

- **Měkké pájky** (teplota tavení je nižší než 450 °C)
- **Tvrdé pájky** (teplota tavení je vyšší než 450 °C) [2]

Následující text bude zaměřen na pájky měkké, protože jsou pro tuto práci stěžejní.

1.2.1 Měkké pájky cínové

Pro pájení v elektronice se převážně používají pájky cínové. Cínové pájky jsou slitiny cínu a olova. Olovo v pájce zaručuje lepší smáčivost a nižší teplotu tání, takže je uživatelsky pohodlnější. Například běžně používaná slitina pájky s označením Sn60Pb obsahuje 60% cínu a 40% olova. [2]

Olovo je však pro člověka a jeho okolí toxické a zatěžuje životní prostředí. V poslední době se tedy od pájek s obsahem olova upouští, i když jejich vlastnosti pro pájení jsou vhodné.

1.2.2 Měkké pájky speciální

Jak bylo zmíněno v předešlém textu, od pájek s obsahem olova se upouští a používají se slitiny jiné. Například dnes rozšířená slitina SnAgCu je slitina cínu, stříbra a mědi. [2]

1.3 Tavidlo a druhy tavidel

Tavidlo je materiál používaný při pájení, který napomáhá pájce se smáčivostí, rozpouštěním a odváděním oxidů základního materiálu.

Tavidla se dělí podobně jako u pájek na tavidla pro:

- Měkké pájení
- Tvrdé pájení

Dále se podle účinku tavidla dělí takto:

- Tavidla s leptavým účinkem (s halovými a kyselinotvornými složkami)
- Tavidla bez leptavého účinku (většinou na bázi pryskyřice) [2]

1.4 Pájecí nástroje a rozdělení

Pájecí nástroje jsou běžně nazývané jako pájedla, dnes se však převážně používá pojem páječka. Jsou to nástroje, které vytváří teplo pro tavení pájky a tím spojování materiálů.

Pájecích nástrojů existuje velké množství. Dají se dělit podle následujících kritérií:

1.4.1 Oblasti použití

- **Pro elektroniku**
- **Pro instalatérství a kovovýrobu**
- **Pro autoklempířství**

1.4.2 Konstrukce

- **Ruční páječky** – klasická pájecí pera s různým výkonem.
- **Pájecí stanice** – komplexní zařízení s regulací teploty a výměnnými hroty.
- **Trafopájky** – využívají transformátor pro rychlý ohřev drátu/hrotu/očka.
- **Mikropájky** – vysoce přesné nástroje pro jemnou elektroniku (SMD, mikroelektronika).
- **Pájecí pece** – slouží k přetavování pájecích past u SMD montáže.
- **Pájecí desky** – podobně jako pájecí pece slouží k přetavování pájecích past.

1.4.3 Typ napájení

- **Elektrické páječky** – napájené ze sítě nebo regulovaným zdrojem.
- **Akumulátorové (bezdrátové) páječky** – napájené z baterie, vhodné pro mobilní použití.
- **Plynové páječky** – používají butan nebo jiný plyn, často kombinované s horkovzdušnou funkcí.

1.4.4 Princip ohřevu

- **Odporové páječky** – ohřev hrotu probíhá pomocí odporového drátu, tělesa.
- **Indukční páječky** – ohřev probíhá elektromagnetickou indukcí.
- **Infračervené pájecí systémy** – využívají IR záření k ohřevu.
- **Horkovzdušné páječky** – využívají horký vzduch k pájení a odpájení. [2]

2 Mikropájka

Mikropájka nebo mikro páječka je zařízení používané pro měkké pájení, pro nahřívání pájky. Mikropájka se běžně používá v průmyslových velkovýrobách, ale v dnešní době ji využívá i většina domácích, soukromých elektrotechniků pro výrobu a opravu DPS.

Mikropájka se skládá ze dvou základních částí, základová část (stanice) a pájecí hrot.

3 Základová stanice

Základová stanice je část, která řídí napájení pájecího hrotu, vyhodnocuje aktuální teplotu hrotu a řídí teplotu hrotu podle uživatelem nastavené teploty ve °C nebo °F. Existují pájecí stanice, u kterých lze nastavovat výkon pájecího hrotu ve Watech, ale tato metoda není uživatelsky příliš oblíbená.

3.1 Druhy napájení pájecích stanic

Napájení pájecí stanice nebo mikro páječky je klíčovou vlastností pro uživatele. Vstupní napájení pájecí stanice lze rozdělit na dva hlavní zdroje:

Síťové zdroje – Napájení těchto druhů pájecích stanic je realizováno připojením do sítě. Ve většině částí světa platí jednofázové napětí 220-240V/50Hz, v některých částech světa však například 120V/60Hz. Dále je s tímto napětím naloženo podle toho, jaký druh regulace výkonu pájecího hrotu je použit, zdali střídavě nebo stejnosměrně. Z toho plyne, že tyto typy pájecích stanic jsou stacionární a jsou vázány k možnosti připojení do sítě.

Elektrochemické zdroje – Elektrochemické zdroje se dají rozdělit na dva základní druhy, Primární články a Sekundární články.

- **Primární články** jsou zdroje, které mají svou energii danou výrobním procesem a během využívání elektrické energie článků dochází k nenávratnému vybíjení.
- **Sekundární články** jsou zdroje, které svou energii získávají nabíjením. Díky průchodu proudu při nabíjení dostává článek zpět svou energii a při využívání elektrické energie se článek vrací do původního stavu. Tento jev je opakovatelný a závisí na typu článku, kolikrát je možné tento proces opakovat. Tyto články se běžně nazývají akumulátory.

Pro konstrukci pájecích stanic s elektrochemickým zdrojem se používají výhradně akumulátory. Převážně se používají články NiMH, Li-Poly a Li-Ion. [4]

3.2 Porovnání výrobců pájecích stanic

Výrobců pájecích stanic je dlouhá řada. Kvalita stanic a cenový rozptyl je také značný. Kvalitní pájecí stanice mohou stát v řádech desítek tisíc korun, méně kvalitní stanice však mohou stát okolo tisíce korun. Cena je většinou dána základovou stanicí, která tvoří dražší část. Pájecí hrot bývá cenově dostupnější.

V následující tabulce (Tabulka 1) je porovnání cen pájecích stanic k **25.2. 2025**. Pájecí stanice jsou od výrobců oblíbených u uživatelů. Dražší pájecí stanice bude nabízet více lepších vlastností. Levnější pájecí stanice však mohou být pro řadu uživatelů dostačující.

Tabulka 1 - Porovnání cen pájecích stanic

Výrobce	Označení	Příkon (W)	Rozsah teplot (°C)	Cena s DPH (Kč)
JBC Tools	CD-2BQF	130	90-450	12 793,35
Hakko	FX888DX-31BY	100	50-480	4089,88
Extol	EXTOL INDUSTRIAL 8794520	70	200-450	1389

Zdroje cen pájecích stanic: **JBC Tools:** [5] **Hakko:** [6] **Extol:** [7]

4 Pájecí hrot

Pájecí hrot je část pájecí stanice, která taví pájku. Hroty jsou důležitou spotřební součástí páječů a pájecích stanic.

4.1 Technologie výroby pájecích hrotů

Pájecí hroty nemají standardizované výrobní předpisy, a proto si téměř každý výrobce volí své rozměry a tvary. Zpravidla jsou však k dostání následující tvary:

- **Jehlové** – extrémně tenké, vhodné pro precizní práci (SMD součástky).
- **Kuželové** – univerzální, dobrý kontakt s pájkou, vhodné pro běžné pájení.
- **Dlátové** – širší plocha, lepší přenos tepla, vhodné pro pájení větších ploch a součástek.
- **Nožové** – šikmá plocha, vhodné pro tahové pájení nebo odstraňování přebytečné pájky.
- **Pro speciální aplikace** – např. hroty se zářezem pro pájení pinů konektorů, zahnuté hroty apod.

Jádra pájecích hrotů jsou běžně vyráběna ze slitin na bázi mědi. Dále je vrstven ocelový plášť, který zachovává pevnost a tvrdost hrotu. Jako svrchní vrstva pokovení je použit nikl pro dodatečnou ochranu hrotu proti mechanickému poškození, proti oxidaci kovů a pro lepší smáčivost pájky.

4.2 Způsob ohřevu hrotu

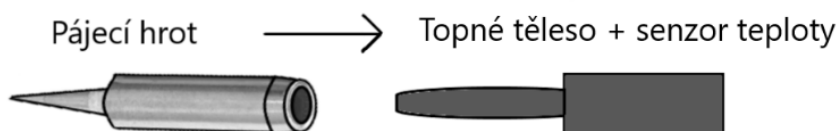
Pájecí hroty se dělí na dvě základní větve, co se týče ohřevu hrotu, **pasivní** a **aktivní** systém.

Aktivní systémy mají topné těleso a senzor teploty integrován přímo v hrotu pájecího pera, ideálně co nejbližší špičce hrotu.

Pasivní systémy mají topné těleso mimo hrot a hrot je na topné těleso pouze nasazen.



Obrázek 2 - Aktivní pájecí hrot [8]



Obrázek 3 - Pasivní pájecí hrot [9]

Na obrázku (Obrázek 2) je pájecí hrot od výrobce JBC. Tento hrot spadá do kategorie hrotů aktivních, má tedy topné těleso a senzor teploty přímo ve špičce hrotu. Tento hrot je měnitelný zasunutím do rukojeti.

Na dalším obrázku (Obrázek 3) je hrot od výrobce Extol. Z obrázku je patrné, že se jedná o pájecí hrot pasivní, a tedy topné těleso a senzor teploty jsou v rukojeti pájecího pera a hrot je nasunut na topné těleso.

Samotným zdrojem tepla topného tělesa bývá zpravidla odporový topný prvek. Kde proud, procházející odporovým drátem nebo odporovou vrstvou, generuje teplo. Někteří výrobci, pro konstrukci topného tělesa a ohřev pájecího hrotu, používají indukční ohřevy. [10][11][12]

4.3 Možnosti napájení hrotu

Správný výběr napájení a regulace topného tělesa pájecího hrotu je důležité pro rychlost odezvy, stabilitu ohřevu hrotu a celkovou efektivitu pájecí stanice. Napájení musí mít dostatečný výkon pro napájení topného tělesa hrotu, kde typické pájecí stanice pracují s výkony od 30W až 150W. Zároveň napájení hrotu musí být přesně regulovatelný pro udržení stabilní teploty hrotu.

4.3.1 Lineární regulace

Lineární regulace je metoda řízení napětí nebo proudu pomocí lineárního regulátoru, který upravuje výstup odváděním přebytečného výkonu ve formě tepla. Tento přístup je jednoduchý a účinný pro aplikace s nízkým výkonem, ale nevhodný pro systémy s vysokým výkonem, protože velké množství energie je nenávratně ztraceno v teple. Pro regulaci vyšších výkonů je tedy nutný vhodně velký chladič.

Aktivní prvek je plynule nastavován tak, aby byl na výstupu odpovídající výkon. Regulátor pracuje v aktivní (lineární) oblasti, což znamená, že se rychle nezapíná a

vypíná, jako jiné druhy regulací. Výstupní napětí se tedy nastavuje podle referenčního napětí a zpětné vazby, která zajišťuje stabilitu.

Typická lineární regulace se skládá z: Aktivního prvku, řídí úbytek napětí; napěťová reference, zajišťuje stabilní referenci (např. Zenerova dioda); zpětnovazební síť, nastavuje aktivní prvek.

Výhody: Jednoduché použití a návrh, použitelný pro obvody náchylné na elektromagnetické rušení

Nevýhody: Nízká účinnost, tvorba ztrátového tepla a potřeba chladiče pro regulace vyšších výkonů, pomalá odezva na změny teploty pro použití v pájecí stanici, běžné lineární regulátory nezvládnou vysoké proudy. [4]

4.3.2 Spínané zdroje s PWM regulací

Spínané zdroje jsou v dnešní době nejrozšířenější druhy napájení elektroniky. Díky své konstrukci mají menší rozměry než klasické napájecí zdroje s transformátorem na 50Hz, zároveň jsou i levnější volbou.

Nejčastěji se používají spínané zdroje s impulsovým transformátorem, spínané zdroje s regulací v primáru. Síťové napětí je usměrněno a filtrováno, dále je toto napětí spínáno ve vysoké frekvenci, zpravidla vyšší než 20kHz z důvodu akustického rušení, dnes jsou frekvence spínání až v řádech MHz. Za spínačem je již zmíněný impulsní transformátor, výstupní usměrňovač a výstupní filtr. Podle výstupního napětí zpětnovazební obvod upravuje řízení spínače, aby výstup byl stabilní. Vysokofrekvenční spínání a koncepce tohoto zdroje zaručuje vysokou účinnost, kompaktní rozměry a nízkou pořizovací cenu.

Spínané zdroje tedy nabízí relativně stabilní výstupní stejnosměrné napětí. Nedoporučuje se však použití těchto zdrojů pro akustickou techniku z důvodu rušení.

Pro použití v aplikacích, kde je potřeba proměnného výkonu, jako je i aplikace v pájecí stanici, je potřeba výstupní napětí zdroje regulovat. Toto je možné provést pomocí PWM. PWM je sice diskrétní modulace signálu, ale v elektronice se dá využít jako regulace výkonu. Spínací prvek rychle spíná vstupní napětí v hodnotách zapnuto nebo vypnuto. Poměru mezi dobou zapnutí a vypnutí v jedné periodě se říká střída. Například v aplikaci pájecí stanice, když bude požadavek na topné těleso pájecího hrotu, aby netopilo, bude střída 0:100, to znamená, že za celou periodu se těleso nesepe ani jednou. Pokud bude střída 50:50, bude výkon na tělese 50% napájecího výkonu. Takto se dá regulovat výkon pájecího hrotu. [13; 14]

4.3.3 Triaková regulace střídavého napětí

Triaková regulace je metoda řízení střídavého proudu pomocí triaku, což je polovodičová součástka schopná vést proud v obou směrech. Tato regulace je často využívána pro řízení výkonu v topných tělesech, svítidlech, motorech ale i v pájecích stanicích.

Triak je tří vývodová součástka, která má vývody A1 a A2. Pro řízení má řídicí elektrodu Gate. Součástka umožňuje vodivost v obou směrech. K sepnutí triaku stačí krátký impuls na Gate. Jakmile se triak sepne, zůstává vodivý, dokud proud neklesne k nule (při průchodu AC nulou).

Fázová regulace

Tato metoda spočívá v řízeném spínání triaku v určitém bodě sinusového průběhu napětí. Spínací impuls je generován s určitým zpožděním od okamžiku průchodu napětí nulou. Čím větší je zpoždění, tím kratší část sinusového signálu je propouštěna na zátěž, a tím nižší je efektivní výkon. Pokud se triak sepne okamžitě (0° zpoždění), tak je na zátěži plný výkon (100%). Triak se sepne až po 90° , na zátěži je poloviční výkon (50%). Triak se sepne až po 120° , malý výkon ($\sim 30\%$).

Výhodou je, že je možnost plynule řídit výkon na různých typech zátěží. Nevýhodou však je vznik harmonických složek v síti a tím i rušení ostatních zařízení.

Spínání v nule

Tato metoda spočívá v tom, že triak se spíná vždy v okamžiku, kdy střídavé napětí prochází nulou. Výkon se reguluje změnou počtu zapnutých a vypnutých půlperiod napětí. Například při zapnutí každé druhé půlperrody je efektivní výkon snížen na 50 %.

Výhody jsou, že nevzniká takové rušení v síti jako u fázové regulace. Zároveň je tato metoda vhodná pro regulaci topných těles. Nevýhoda je takový, že regulace je méně plynulá, takže se nehodí pro regulaci např. motorů. [15; 14]

5 Regulační algoritmy

5.1 Dvoustavová regulace

Nejjednodušší forma řízení, při které je výkonový prvek (např. topné těleso) buď zcela zapnutý, nebo zcela vypnutý. Systém sleduje rozdíl mezi aktuální a požadovanou hodnotou a na základě toho přepíná výstupní stav. Tento regulační algoritmus se také někdy nazývá „on-off“ regulace nebo „Bang-bang“ regulace, název vychází z angličtiny a odkazuje na prudké, okamžité změny výstupního signálu. Princip regulace:

- Pokud $x < x_{\text{nastaveno}} - \text{hystereze}$ → zapni výstup
- Pokud $x > x_{\text{nastaveno}} + \text{hystereze}$ → vypni výstup

Výhody: Extrémně jednoduchá implementace, nepotřebuje žádné výpočty ani kalibraci.

Nevýhody: Teplota kolísá mezi dvěma hodnotami (nestabilita), pomalá odezva při změně zátěže, nehodí se pro aplikace s požadavkem na přesné řízení. [16]

5.2 PID regulace

PID regulace patří mezi nejpoužívanější metody automatického řízení v technické praxi. Jejím cílem je minimalizovat odchylku řízené veličiny od požadované hodnoty a zároveň zajistit stabilní a rychlou odezvu systému bez výrazného překmitu nebo kolísání okolo požadované hodnoty.

Zkratka PID vychází ze tří složek, které tvoří řídicí zákon: **P** – Proporcionální, **I** – Integrační, **D** – Derivační.

5.2.1 Základní princip PID regulace

Řídicí algoritmus pracuje s tzv. regulační odchylkou $e(t)$, což je rozdíl mezi žádanou, referenční hodnotou $r(t)$ a aktuální výstupní hodnotou systému $y(t)$:

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (5.1)$$

Na základě této odchylky PID regulátor vypočítá řídicí signál $u(t)$, který se aplikuje na vstup řízeného systému:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (5.2)$$

kde: K_p – zesílení proporcionální složky, K_i – zesílení integrační složky, K_d – zesílení derivační složky.

5.2.2 Funkce jednotlivých složek

Proporcionální složka (P) - Reaguje přímo na okamžitou hodnotu chyby. Čím větší chyba, tím větší zásah do systému.

Integrační složka (I) - Sleduje celkovou hodnotu chyby v čase. Pokud systém dlouhodobě nedosahuje požadované hodnoty, integrace tuto odchylku „nasčítá“ a zesílí výstup. Eliminuje trvalou odchylku, při prudké změně vstupu může způsobit přestřel (tzv. integrální překmit).

Derivační složka (D) - Zohledňuje rychlost změny chyby. Působí prediktivně – pokud se chyba mění příliš rychle, regulační zásah se upraví tak, aby změnu „přibrzdil“. Omezuje přeskmitu a zrychluje ustálení je však citlivá na šum a nestabilitu v měření.

5.2.3 Použití PID v praxi

PID regulace se používá v celé řadě aplikací napříč průmyslem a elektronikou:

Teplotní regulace (klimatizace, pece, termostaty), Pohony motorů (řízení rychlosti, polohy), Tlakové a hladinové systémy (čerpadla, ventily), Letectví, robotika (stabilizace, řízení trajektorií), Mechatronika (řízení polohy a síly). [16; 14]

5.3 Adaptivní regulace

Používá dynamické nastavení parametrů regulace (např. PID) v závislosti na aktuálním stavu systému. Systém se sám učí, jak řídit výstup pro nejlepší výsledek.

Výhody: Vysoká odolnost vůči změnám podmínek, není nutné ručně ladit parametry.

Nevýhody: Náročné na implementaci, vyšší výpočetní náročnost. [16; 14]

6 Způsoby měření teploty hrotu

Pro měření teploty pájecího hrotu se nabízí více relevantních možností měření teploty. U měření teploty je žádoucí, aby přesnost měření teploty bylo alespoň na jednotky °C. Zároveň je nutné, aby senzor měření teploty měřil v ideálním případě lineárně a v rozsahu teploty pájecího hrotu.

6.1 Kovové odporové senzory teploty

Principem kovových odporových senzorů teploty je závislost elektrického odporu kovu na jeho teplotě. Kovy mají pevnou krystalickou mřížku tvořenou atomy kovu. Při zvyšující se teplotě roste kinetická energie těchto atomů, což vede k intenzivnějším vibracím v mřížce. S rostoucí teplotou se amplituda těchto kmitů zvětšuje, čímž se zvyšuje pravděpodobnost rozptylu vodivostních elektronů na vibrujících atomech. Tento rozptyl elektronů snižuje jejich střední volnou dráhu, což vede ke zvýšení elektrického odporu kovu. [17]

Elektrický odpor v závislosti na teplotě je vyjádřen následující rovnicí (Rovnice 6.1).

$$R(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (6.1)$$

Kde:

- $R(T)$ je odpor při teplotě T ,
- R_0 je odpor při referenční teplotě (např. 20 °C),
- α je teplotní součinitel odporu,
- ΔT je rozdíl teplot ($T - T_0$). [17]

6.1.1 Teplotní součinitel

Kladný teplotní součinitel odporu (PTC)

- Většina kovů (měď, železo, stříbro, zlato, hliník) má kladný α . To znamená, že při zvýšení teploty roste elektrický odpor.

- Např. měď má $\alpha \approx 0,0039 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ → při zvýšení teploty o 100 °C se její odpor zvýší téměř o 40 %.

Záporný teplotní součinitel odporu (NTC)

- Některé materiály (grafit, uhlík, polovodiče, bismut) mají záporný α .
- To znamená, že při zvýšení teploty odpor klesá – vzniká více volných nosičů náboje.

Nulový nebo téměř nulový součinitel

- Konstantan (Cu-Ni slitina) má $\alpha \approx 0$, což znamená, že jeho odpor se skoro nemění s teplotou – používá se v přesných rezistorech. [18; 19]

6.1.2 Platinové snímače teploty

Odporové platinové snímače jsou nejrozšířenější a nejvyužívanější v obecném použití i v průmyslu. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání.

Platinové snímače teploty pro průmyslové (provozní) použití dělí do dvou tolerančních tříd. Třída A je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 650 °C, třída B je stanovena pro rozsah teploty od -200 °C do 850 °C. [17]

Tabulka 2 - Dovolené tolerance dle IEC-751 (0-500 °C) [17]

Teplota (°C)	Třída přesnosti A		Třída přesnosti B	
	(Ω)	(°C)	(Ω)	(°C)
0	±0,06	±0,15	±0,12	±0,3
100	±0,13	±0,55	±0,48	±1,3
200	±0,20	±0,24	±0,24	±0,24
300	±0,27	±0,75	±0,64	±1,8
400	±0,33	±0,95	±0,79	±2,3
500	±0,38	±1,15	±0,93	±2,8

Platinové snímače teploty jsou používány převážně v podobě Pt100. **Pt** je označení materiálů, ze kterého je vyroben snímač (platina). **100** je označení pro $R_0 = 100\Omega$ (snímač má při teplotě 0 °C 100 Ω). Kromě základní hodnoty $R_0 = 100\Omega$ se snímače vyrábí se základní hodnotou odporu 50, 200, 500, 1000 a 2000 Ω. Pt100 a Pt1000 jsou však nejvíce využívané. [17]

Platinový snímač by tedy mohl být vhodným adeptem pro konstrukci a měření teploty pájecího hrotu, naráží se však na problém jeho konstrukční velikosti, kde typická velikost senzoru je 2-10 mm a tloušťka aktivního prvku je 0,2-1 mm.

6.1.3 Niklové a měděné snímače teploty

Niklové snímače teploty jsou většinou vyráběny tenkovrstvou technologií. Výhodou niklových snímačů je velká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. Nevýhodou však je omezený teplotní rozsah a vůči platině značná nelinearita, horší dlouhodobá stabilita a odolnost vůči působení okolního prostředí.

Měděné snímače teploty se používají v teplotním rozsahu od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k snadné oxidaci a vyšší vodivosti mědi oproti platině se měděné snímače běžně nepoužívají. [17]

Niklové ani měděné snímače teploty tedy nejsou vhodnými adepty pro konstrukci a měření teploty pájecího hrotu.

6.2 Polovodičové odporové senzory teploty

Polovodičové odporové senzory využívají stejně jako kovové odporové senzory teplotní závislost odporu. Polovodičové odporové senzory teploty lze rozdělit na:

-Termistory

-Monokrystalické odporové senzory

6.2.1 Termistory

Termistory patří mezi nejpoužívanější senzory teploty v elektronice. Termistor je teplotně závislý odpor zhotovený z polovodičových feroelektrických keramických materiálů. Keramická technologie umožňuje výrobu termistorů v různých tvarech.

Termistory lze rozdělit na:

1. Negastory (NTC termistory)

2. Pozistory (PTC termistory)

Výhody termistorů jsou, levná pořizovací cena, jednoduché zapojení, vhodné rozměry i z hlediska zakomponování k hrotu pájecího pera.

Nevýhodami termistorů však je špatná stabilita při vyšších teplotách, nelineární charakteristika a menší teplotní rozsah oproti Pt100. [17]

I přesto, že z teoretického hlediska by termistor mohl být použitelný pro měření teploty pájecího hrotu, nebude vhodným adeptem pro konstrukci pájecí stanice, protože v klíčových vlastnostech termistor neobstojí oproti ostatním sensorům.

6.2.2 Polovodičové monokrystalické odporové senzory teploty

Monokrystalické senzory teploty se vyrábí z křemíku, germania, india a jejich slitin. V průmyslové praxi se používají křemíkové senzory v rozsahu od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, což nejsou hodnoty vhodné pro měření teploty pájecího hrotu, který dosahuje teplot až

450 °C. Pro větší teplotní rozsah (-100 °C až 450 °C) lze využít senzor SiC (křemík, uhlík).

Monokrystalický polovodičový teplotní senzor není vhodný pro měření teploty hrotu pájecí stanice, protože běžné senzory nevydrží teploty nad 150 °C, je citlivý na tepelné a mechanické namáhání, má pomalou odezvu kvůli nízké tepelné vodivosti polovodiče a podléhá elektromagnetickému rušení z topného systému páječky. [17]

6.3 Termoelektrické články

Termoelektrické články nebo termočlánky patří mezi nejlevnější snímače teploty díky jejich jednoduché konstrukci.

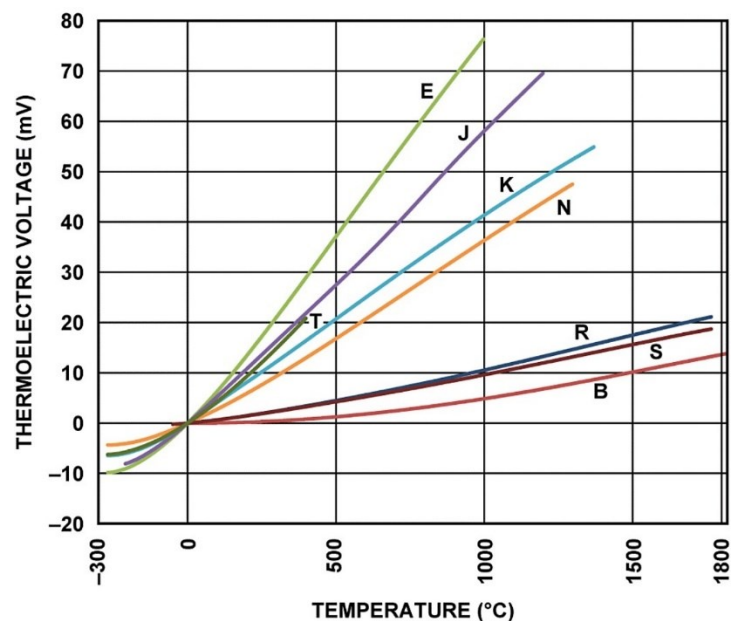
6.3.1 Seebeckův jev, princip termočlánku

Funkce termočlánků je založena na principu Seebeckově jevu. Tento jev spočívá v tom, že tepelná energie je převáděna na energii elektrickou. Pokud budou spojeny dva různé kovy na obou koncích a bude mezi spojenými konci teplotní rozdíl, začne mezi nimi vznikat elektrické napětí. To je způsobeno tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii. Díky tomu nositelé náboje z teplejších míst difundují do míst chladnějších a vzniká tok elektrického proudu. Velikost vzniklého napětí závisí na druhu použitých kovů a na velikosti teplotního rozdílu mezi spoji, dá se však říci, že vzniklé napětí je velmi nízkých hodnot v řádech mikrovoltů nebo milivoltů. Měřicí spoj je nazýván horkým spojením a referenční spoj, který je ideálně v neměnné teplotě se nazývá spoj studený. [17]

6.3.2 Typy termočlánků

Jednotlivé páry materiálů použitých pro výrobu termočlánků jsou ve světě normalizovány. Pro páry byly vybrány materiály, které nabízejí ucházející nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný teplotní rozsah a další vlastnosti jako jsou například: odolnost proti korozi a chemickým vlivům, dlouhodobá stabilita. [17]

V následujícím grafu (Obrázek 4) jsou vyobrazeny charakteristiky vybraných termočlánků.



Obrázek 4 - Charakteristiky vybraných TC [21]

V následující tabulce (Tabulka 3) jsou vypsány vlastnosti vybraných termočlánků.

Tabulka 3 - Základní údaje TC [17]

Kód	Složení (kladný / záporný vodič)	α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) při 100 °C	Rozsah teplot ($^\circ\text{C}$)	Maximální odchylka ($^\circ\text{C}$)
K	Chromel (NiCr) / Alumel (NiAl)	42	-200 až 1200	$\pm 2,2$
J	Železo (Fe) / Konstantan (CuNi)	54	-40 až 750	$\pm 2,2$
T	Měď (Cu) / Konstantan (CuNi)	46	-250 až 400	$\pm 1,0$
E	Chromel (NiCr) / Konstantan (CuNi)	68	-40 až 900	$\pm 1,7$
N	Nikrosil (NiCrSi) / Nisil (NiSiMg)	30	-270 až 1300	$\pm 2,2$
S	Platina-Rhodium (PtRh10) / Platina (Pt)	8	0 až 1600	$\pm 1,5$
R	Platina-Rhodium (PtRh13) / Platina (Pt)	8	0 až 1600	$\pm 1,5$
B	Platina-Rhodium (PtRh30) / Platina-Rhodium (PtRh6)	1	100 až 1800	$\pm 1,5$

Vysvětlení parametrů:

- **α (Seebeckův koeficient) ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)** – napětí generované termočlánekem na každý stupeň celsia teplotního rozdílu. Vyšší hodnota znamená citlivější termočlánek.
- **Rozsah teplot** – doporučený pracovní rozsah termočlátku.
- **Maximální odchylka** – typická chyba měření při běžných podmínkách. [17]

Z tabulky (Tabulka 3) je zřejmé, že pro konstrukci pájecí stanice a pro využití termočlátku pro měření teploty hrotu budou ucházející typy: **K**, **J**, **E** a **N**, protože splňují teplotní rozsah pro měření teploty pájecího hrotu.

Typ K je však nejčastěji používaný pro aktivní i pasivní pájecí hroty. **Typ J** by mohl být vhodným adeptem, ale kovy tohoto článku mohou rychleji degradovat při dlouhodobém používání. **Typy E** a **N**, nejsou běžně používány v těchto konstrukcích, i když splňují teplotní rozsah. [17]

6.4 Porovnání senzorů pro měření teploty hrotu

Odporové kovové senzory (např. Pt100) nabízí vysokou přesnost a stabilitu měření, avšak mají pomalejší odezvu a jsou nákladnější. Pro aplikace s rychlými změnami teploty, jako je měření hrotu pájky, nejsou optimální, ale v některých stanicích se přesto používají kvůli přesnosti.

Polovodičové odporové senzory (NTC, PTC) jsou levné a snadno použitelné, avšak jejich teplotní rozsah je nedostačující a reakční doba je pomalejší, což je činí nevhodnými pro přímé měření hrotu.

Termočlánky, zejména typ K, jsou nejpoužívanější volbou díky rychlé odezvě, vysoké teplotní odolnosti a jednoduché konstrukci. I když mají menší přesnost, ve srovnání s odporovými senzory, nabízí dostatečně stabilní měření, což je důvod, proč jsou široce využívány v pájecích stanicích.

Nejlepší volbou pro měření teploty hrotu pájecí stanice jsou termočlánky, a to zejména **typ K**.

6.5 Připojení a zpracování signálu ze senzoru teploty

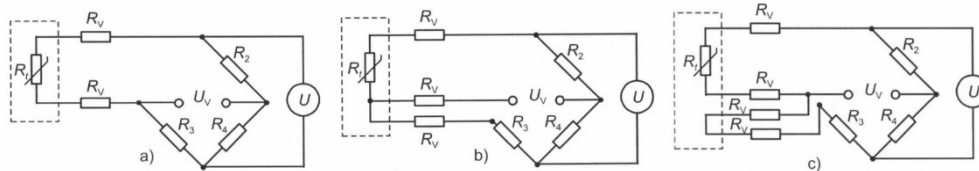
Přesnost měření nezávisí pouze na senzoru, ale zároveň také na precizním čtení vyhodnocování měřené veličiny.

6.5.1 Odporové kovové senzory teploty

Jak bylo zmíněno v předešlém textu, odporové kovové senzory vykazují změnu elektrického odporu při změně teploty. Změna elektrického odporu na 1°C je přibližně $0,385\ \Omega$ (u senzoru Pt100). Tento fakt znamená, že při takto malé změně odporu je zapotřebí precizní vyčítání hodnoty. Velmi důležité při měření teploty kovovým

odporovým senzorem je brát v potaz odpor vedení k senzoru. Dále je od měřícího obvodu vyžadováno, aby měřicí proud procházející senzorem byl minimální.

Pro zapojení těchto snímačů se běžně používá **Wheatstoneův můstek** ve **dvouvodičovém** (Obrázek 5a), **třívodičovém** (Obrázek 5b) a **čtyřvodičovém** (Obrázek 5c) zapojení, zapojení jsou zobrazeny na obrázku níže (Obrázek 5)



Obrázek 5 - Wheatstoneův můstek [17]

Dvouvodičové zapojení je nejjednodušší, ale naráží na problém, že elektrický odpor vedení může značně ovlivnit měření teploty. Používá se při velmi krátkých vzdálenostech a na místech, kde není zapotřebí maximální přesnost. Pro kompenzaci odporu vedení existují **Třívodičové** a **čtyřvodičové zapojení**.

Dále se také používá takzvaný Aktivní můstek, kde operační zesilovač zajišťuje proudové napájení snímače. [17]

6.5.2 Polovodičové senzory teploty

1. Termistory – Vyžadují odporový dělič pro převod na napěťový signál, dále se zařadí ADC pro převod na digitální hodnotu. Poté je zapotřebí pomocí lineární aproximace převést signál na jednotku teploty.

2. Analogové polovodičové senzory – Výstupem je napětí úměrné teplotě (např. 10 mV/°C). Signál je obvykle v rozsahu 0 – 3,3 V nebo 0 – 5 V (pro kompatibilitu s ADC mikrokontroleru).

Těchto senzorů teploty existuje mnoho. Například **TMP36** nebo **LM35** se vyrábí v různých pouzdrech jako TO-92, TO-220 nebo SO8.

3. Digitální polovodičové senzory – Tyto senzory poskytují přímý digitální výstup, např. I²C nebo SPI. Vnitřní kalibrace zajišťuje vyšší přesnost oproti analogovým snímačům. Výstupem senzoru je přímo hodnota ve °C nebo °F.

Tyto senzory, např. **DS18B20**, **SHT30** nebo **TMP117**, se vyrábí v pouzdrech integrovaných obvodů, ale běžně jsou k dostání jako předem připravená DPS, ke které stačí připojit komunikaci s mikrokontrolerem. [17; 20]

6.5.3 Termoelektrické články

Jako bylo zmíněno v kapitole o principu fungování termočlánku, výstupem termočlánku je velmi nízké napětí, v řádech mikrovoltů. Signál z termočlánku je tedy nutné zesílit. K tomu se používají operační nebo instrumentační zesilovače s vysokým

zesílením a nízkým teplotním driftem. Instrumentační zesilovače poskytují vysokou přesnost a stabilitu signálu.

Protože termočlánek měří pouze rozdíl teplot mezi horkým a studeným spojem, je nutné kompenzovat teplotu studeného spoje, která se může měnit podle okolních podmínek, jako zahřívání elektroniky nebo teplota v místnosti. Tato kompenzace se provádí měřením teploty studeného spoje jiným senzorem, například polovodičovým snímačem (např. **TMP36**, **LM35**) nebo odporovým teploměrem (např. **Pt100**). Získaná teplota studeného spoje je poté přepočítána na odpovídající napětí, které je přičteno k výstupnímu signálu termočládku.

Po zesílení a kompenzaci je signál termočládku převeden na digitální hodnotu pomocí ADC. Vzhledem k nízkému výstupnímu napětí termočládku je vhodné použít převodníky s vysokým rozlišením (minimálně 12bit, ideálně 16bit). A signál je převeden na některý druh digitální komunikace (I2C nebo SPI).

V dnešní moderní době existují integrované obvody, které kompletně pokryjí výše zmíněný postup měření a převod teploty. Mezi tyto integrované obvody, takzvané univerzální zesilovače termočládků, patří například:

- **AD8495** (Analog Devices) pro analogový výstup. Nabízí kompenzaci studeného spoje. Napěťový výstup úměrný teplotě (10 mV/°C). Vhodný pro připojení k ADC mikrokontroleru. Podporuje termočládky typu K.
- **AD594/AD595** (Analog Devices) pro analogový výstup. Napěťový výstup úměrný teplotě (10 mV/°C). Podporuje termočládky typu J (AD594) a K (AD595).
- **MAX31856** (Maxim Integrated) Novější a univerzálnější verze než MAX31855. 19bit ADC s vysokým rozlišením. Digitální rozhraní SPI. Možnost softwarové kalibrace. Podporuje termočládky typu K, J, N, T, S, R, E, B.
- **MCP9600** (Microchip) Vestavěná kompenzace studeného spoje. 18bit ADC. Digitální rozhraní I²C. Podporuje termočládky typu K, J, T, N, S, E, B, R.

[17; 21; 22; 23; 24]

7 Požadavky pro návrh pájecí stanice

Hlavní myšlenkou a významem výroby vlastní pájecí stanice je ušetření finančních prostředků oproti koupi sériově vyráběných pájecích stanic. Další přidanou hodnotou výroby vlastní pájecí stanice je to, že je možnost navrhnout vlastní vzhled stanice.

Pro výrobu pájecí stanice a ostatně jakéhokoliv zařízení nebo výrobku, je zprvu potřeba stanovit si cíle a požadavky finálního produktu nebo výrobku. Je možné a běžně se stává, že některý z předem vymyšlených požadavků není možné zrealizovat.

Proto je nutné důkladně promyslet postup výroby a technické parametry finálního výrobku.

8 Napájení pájecí stanice

Dříve než dojde k návrhu samotné pájecí stanice, je nutné stanovit si, jak bude celá stanice napájena. V kapitole týkající se napájení pájecích stanic bylo zmíněno, že pájecí stanice mohou být napájeny dvěma způsoby. Jeden ze dvou způsobů napájení je pomocí akumulátoru. Tento způsob se v poslední době rozšiřuje. Je efektivní, co se týče mobility při pájení, naráží však na problém nabíjení akumulátoru a dálkové komunikace.

Při návrhu této pájecí stanice bude využito síťové napájení. Výhodou tohoto napájení je relativní jednoduchost návrhu a není nutné řešit problém nabíjení akumulátorů a jejich životnost.

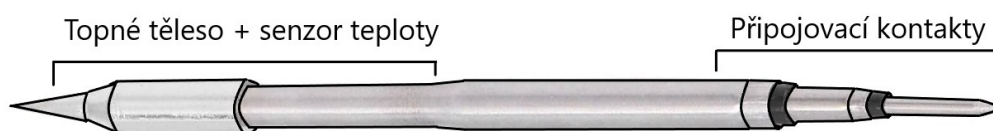
9 Výběr hrotu pro pájecí stanici

Typů pájecích hrotů a výrobců je velké množství. Pro návrh této pájecí stanice bude kladen důraz na to, aby hrot byl kvalitní, jinak by tento projekt postrádal významu. Při výběru hrotu byl kladen důraz na to, aby pájecí hrot byl aktivní – topné těleso přímo v hrotu. Výběr se tedy zúžil na méně výrobců.

Mezi výrobce pájecích stanic a aktivních pájecích hrotů patří i Španělský výrobce **JBC**. Pro návrh této pájecí stanice byl zvolen tento výrobce. Tento výrobce byl zvolen z důvodu dostupnosti hrotů, spolehlivosti, kvalitní konstrukce a široké zákaznické základny. Pájecí hroty od JBC však nepatří mezi nejlevnější na trhu. Toto rozhodnutí nestaví ostatní výrobce do role „horších“ hrotů, jde však pouze o autorovu preferenci z důvodu předešlých zkušeností.

9.1 Koncepce pájecího hrotu JBC

Aktivní pájecí hroty od JBC se vyrábí ve více provedení. Základní koncepce je však stejná. Aktivní pájecí hrot je připojen vsunutím dovnitř rukojeti.



Obrázek 6 - Aktivní pájecí hrot [8]

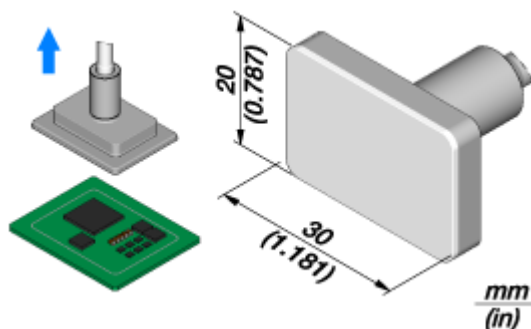
Na obrázku (Obrázek 6) je zobrazen pájecí hrot. JBC pájecí hroty obsahují topné těleso a termočlánek typu K. Obsazení termočláneku bylo zjištěno zkušebními měřeními pomocí MAX31856. Jelikož topné těleso i termočlánek mají dva vývody a pájecí hrot

má pouze tři kontakty, jeden připojovací kontakt je společný pro topné těleso a termočlánek. Měřením elektrického odporu na kontaktech hrotu bylo zjištěno, že dva krajní kontakty mají $0,15\Omega$. Tato hodnota by odpovídala odporu termočláneku, protože termočlánek jsou dva spojené vodiče. Mezi prostředním kontaktem a kontaktem vlevo podle obrázku (Obrázek 6) bylo naměřeno $2,38\Omega$, tato hodnota by odpovídala topnému tělesu.

9.2 Druhy pájecích hrotů JBC

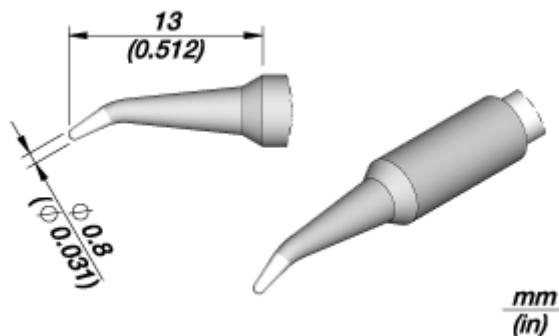
Aktivní pájecí hroty výrobce JBC mají označení Cxxx, kde C značí Cartrige (česky "kazetový hrot" nebo "vločka hrotu"). Mezi nejpobulárnější pájecí hroty od JBC patří následující:

C470 – Tato řada patří mezi rozměrově největší. Tyto hroty nejsou přímo určeny pro pájení DPS. Používají se převážně pro pájení větších komponent jako jsou třeba antény. Výkon topného tělesa hrotů této řady dosahuje až 250W. Tyto hroty jsou tedy určeny pro speciální pájení a některé z nich mohou vypadat na první pohled zvláště, ale všechny mají své využití. Na obrázku níže (Obrázek 7) je zobrazen pájecí hrot, který je přímo určen pro odstranění RF stínění. [25]



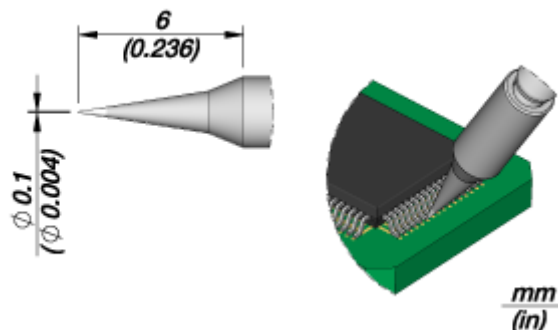
Obrázek 7 - JBC C470-057 RF shield removal [25]

C245 – Tato řada se považuje za nejvíce univerzální hroty pro běžné použití. Hroty z této řady jsou vhodné pro pájení vývodových součástek, ale je možnost pájet i součástky SMD. Výkon topného tělesa dosahuje 130W. [25]



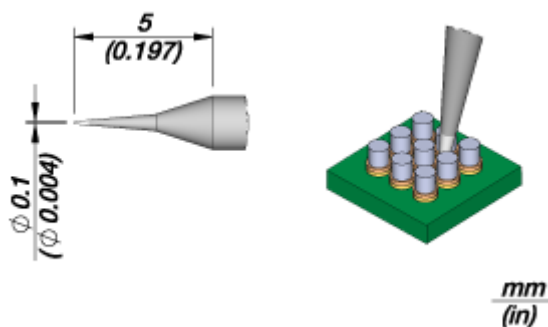
Obrázek 8 - JBC C245-935 Conical bent [25]

C210 – Tato řada je již oproti předešlým výrazně užší a kratší. Jejich konstrukce je ideální pro použití při pájení desek a součástek malých rozměrů, především však součástky SMD. Výkony topných těles těchto hrotů dosahují 40W. [25]



Obrázek 9 - JBC C210-020 Conical tip [25]

C115 – Tato řada hrotů patří mezi maximálně precizní. Hroty nejsou odolné jako předchozí, proti mechanickému poškození. Zpravidla se používají při pájení pod mikroskopem pro velmi malé SMD součástky. Výkon topného tělesa dosahuje pouze 15W. [25]



Obrázek 10 - JBC C115-126 Conical tip [25]

9.3 Zvolený pájecí hrot

Pro návrh této pájecí stanice byl zvolen pájecí hrot JBC C245-789. Tento hrot byl zvolen z důvodu jeho všestrannosti, co se týče pájení SMD i vývodových součástek.

9.4 Rukojeť pájecího hrotu

Rukojeť tvoří další významnou část pájecí stanice. Do rukojeti je pájecí hrot zasunut, v případě použití aktivního pájecího hrotu. Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách aktivní pájecí hrot má své připojovací kontakty. U pájecích hrotů značky JBC jsou kontakty tři. Z kontaktů rukojeti jsou dále kabelem vyvedeny tři vodiče do konektoru.

Vyvedení kontaktů je vodiči barvy: zelené, modré a červené. Zelený vodič je pro společný kontakt termočláнку a topného tělesa. Modrý vodič je druhý pól topného tělesa. Červený vodič je pro T+ termočláнку.



Obrázek 11 - Rukojeť JBC T245 (bez hrotu) [Foto autor]

10 Řídící systém pájecí stanice

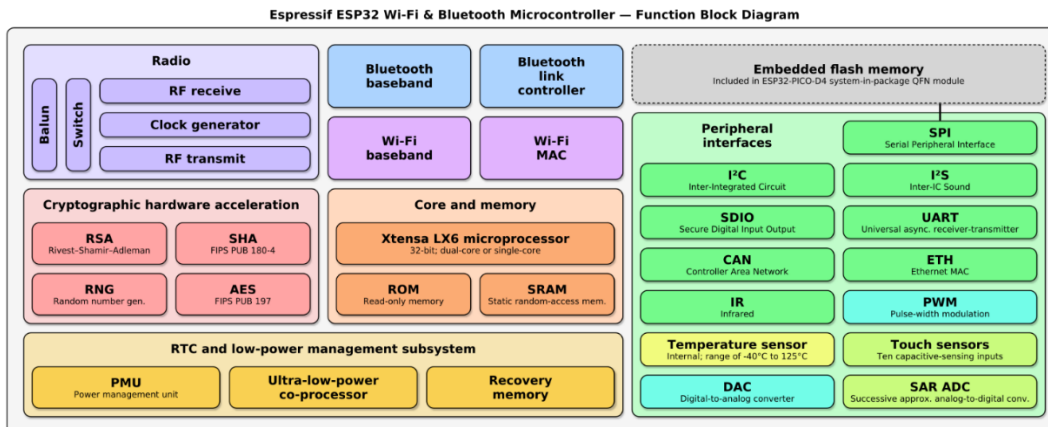
Jako řídicí systém pro návrh této pájecí stanice byl vybrán mikrokontroler ESP32. ESP32 je výkonný mikrokontroler od firmy Espressif Systems, který nabízí Wi-Fi a Bluetooth konektivitu a další vestavěné systémy. Oproti předchůdci, ESP8266, přináší vyšší výkon, více periférií a podporu více vláknového zpracování pomocí dvou procesorových jader.

10.1 Vlastnosti ESP32

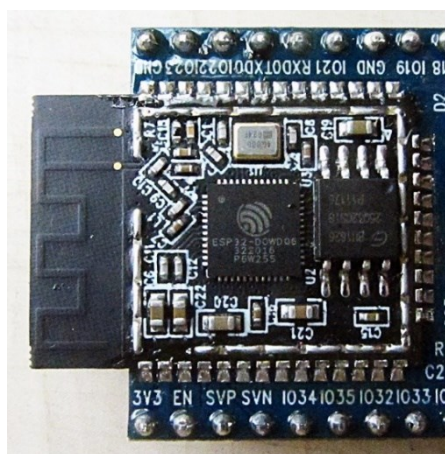
ESP32 je postaveno na dvoujádrovém procesoru Tensilica Xtensa LX6, který může běžet na frekvenci až 240 MHz. Kromě vysokého výpočetního výkonu nabízí široké spektrum periférií, mezi které patří:

- **Bezdrátová konektivita:** Wi-Fi (802.11 b/g/n) a Bluetooth 4.2 (BLE).
- **Vstupy a výstupy (GPIO):** Až 34 univerzálních I/O pinů (v závislosti na variantě čipu).
- **Analogové vstupy:** 12bitový ADC (až 18 kanálů).
- **Analogové výstupy:** 8bitový DAC (2 kanály).
- **Časovací a komunikační rozhraní:** PWM, SPI, I²C, UART, I²S, CAN.
- **Vestavěné uložení:** SRAM 520 KB, Flash paměť 448 KB, NVRAM 16 KB.

Tyto vlastnosti dělají z ESP32 ideální mikrokontroler pro řízení, které vyžadují rychlé zpracování dat a komunikaci mezi zařízeními. [26; 27]



Obrázek 12 - Blokové schéma ESP32 [27]



Obrázek 13 - Modul s obvodem ESP32 [26]

10.2 Využití ESP32 v pájecí stanici

ESP32 bylo pro návrh pájecí stanice zvoleno z důvodu jeho univerzálnosti, jednoduchosti a zároveň dostupnosti. ESP32 obsahuje periferie nutné pro konstrukci pájecí stanice. Tvorba samotného programu pro řízení je v programovacím jazyce a prostředí, které je obecně velmi rozšířené a má velkou základnu uživatelů. Návodů a knihoven je také velké množství.

ESP32 je schopné řídit a zpracovávat teplotu pájecího hrotu, reagovat na nastavení teploty uživatelem a hodnoty zobrazovat. Oproti běžným MCU je možnost zakomponovat dálkovou komunikaci skrze BT nebo Wi-Fi, která však v tomto projektu není využita.

ESP32 je běžně dostupné, v různých provedení jako samotný integrovaný obvod nebo jako hotový modul pro přímé použití, jako je zachyceno na obrázku. (Obrázek 13).

11 Měření teploty pájecího hrotu

Jak bylo zmíněno v kapitole o použitém pájecím hrotu, pájecí hrot v sobě spolu s topným tělesem obsahuje senzor teploty. Senzorem teploty je termočlánek typu K. Termočlánek je téměř u špičky hrotu.

11.1 Měření teploty

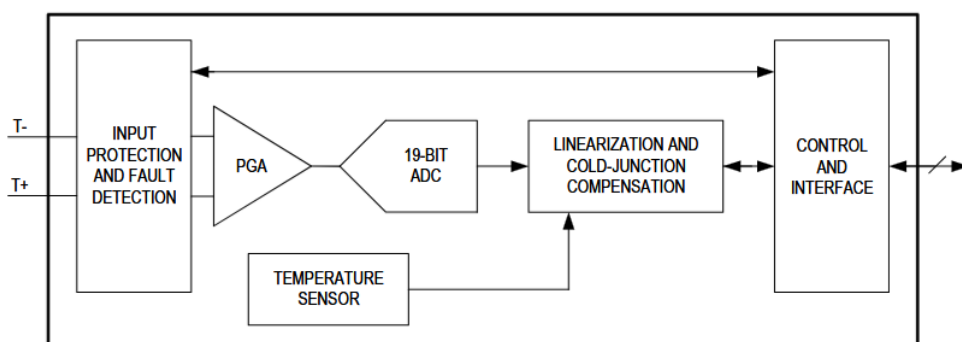
Samotné měření teploty a čtení hodnoty z termočláneku by teoreticky bylo možné i za použití pouze ESP32. ESP32 má 12bitový ADC s rozsahem 0–3.3V, který by se na tuto aplikaci dal použít, ale jelikož termočlánek typu K generuje asi $40 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, bylo by měření značně nepřesné. Zároveň je nutné znát teplotu studeného spoje termočláneku, takže by bylo zapotřebí snímat tuto teplotu. Problém s rozsahem měření by se dal upravit za použití převodníku. [27]

11.2 Použití převodníku pro termočlánek

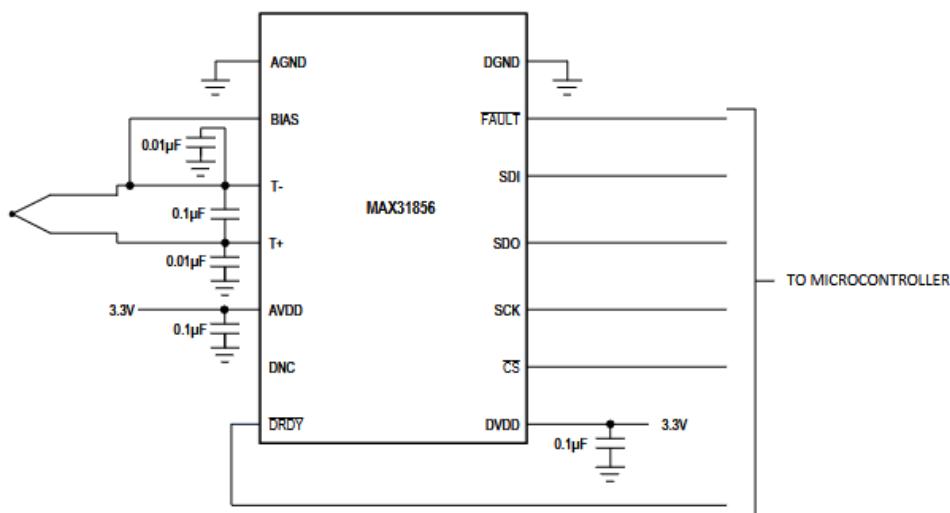
Pro tyto aplikace byly vyvinuty integrované obvody, které řeší oba problémy, zesílení signálu a kompenzaci studeného spoje. Tyto obvody byly zmíněny v kapitole o termočláncích. Z těchto obvodů byl pro konstrukci pájecí stanice zvolen obvod **MAX31856**.

MAX31856 je precizní převodník z termočláneku na digitální podobu s linearizací. Podporuje typy termočláneků K, J, N, R, S, T, E a B. Umožňuje měření teplot v rozmezí od -210°C do $+1800^\circ\text{C}$, podle typu použitého termočláneku. Převodník má vysokou přesnost měření díky 19bitovému ADC a integrované kompenzaci studeného spoje. Převodník komunikuje prostřednictvím SPI rozhraní, což umožňuje snadnou komunikaci s mikrokontrolery, jako je ESP32. Vstup pro termočlánek je chráněn proti přepětí až do $\pm 45\text{ V}$, což zvyšuje odolnost zařízení i v náročných podmínkách.

MAX31856 se vyrábí jako integrovaný obvod v SMD podobě. Je však k dostání i jako hotový modul pro přímé zakomponování do projektu. Na obrázku (Obrázek 15) je typické zapojení. [23]



Obrázek 14 - MAX31856 Blokový diagram měření [23]

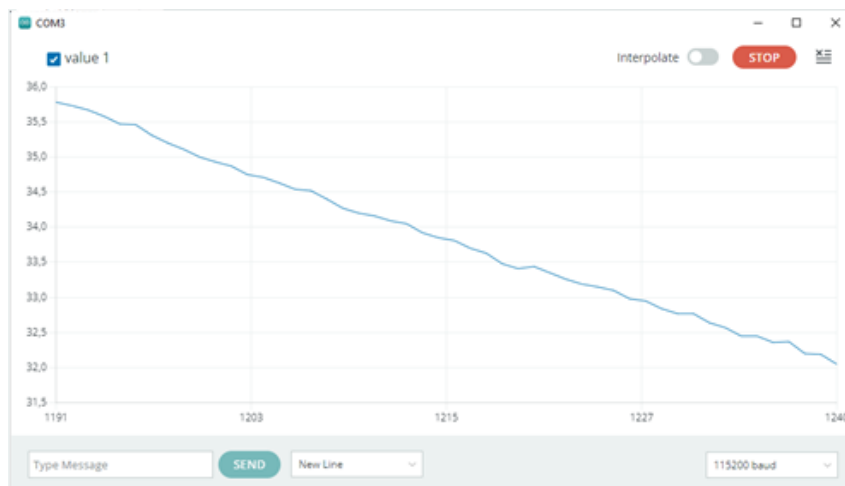


Obrázek 15 - MAX31856 typické zapojení [23]

11.3 Problematika měření teploty

Měření teploty pomocí MAX31856 je přesné a s rychlou odezvou na změny teploty. Při měření teploty použitého pájecího hrotu JBC však nastává určitý problém. Jak bylo zmíněno v kapitole o použitém pájecím hrotu, pájecí hrot má integrované topné těleso a termočlánek přímo v pájecím hrotu. Pro termočlánek a topné těleso jsou použité pouze tři kontakty a z toho plyne, že jeden připojovací kontakt je společný pro termočlánek a topné těleso.

Při testování měření teploty termočlánek v pájecím hrotu vykazoval termočlánek a vyčtená teplota z MAX31856 odpovídající hodnoty. Problém však nastal v momentě, kdy bylo společně s měřením teploty napájeno topné těleso. Z konstrukčních důvodů společného připojovacího kontaktu bylo při současném měření teploty a napájení topného tělesa měření značně ovlivněno a rušeno. Na obrázku níže (Obrázek 16) lze sledovat výstup termočlánek pájecího hrotu za použití MAX31856. Kde osou svislou je teplota ve °C a osou vodorovnou je čas. Toto měření bylo provedeno ve vývojovém prostředí Arduino IDE, které nabízí možnost tvorby grafu z aktuálních hodnot.



Obrázek 16 - Graf výstupu TC hrotu [Snímek obrazovky autor]

Na dalším obrázku (Obrázek 17) lze sledovat, že v momentě přiložení napájení ke kontaktu topného tělesa došlo k okamžité změně hodnoty svislé osy v nesmyslný údaj.



Obrázek 17 - Graf výstupu TC hrotu, rušení [Snímek obrazovky autor]

Z tohoto zjištění vyplývá to, že je nutné ošetřit tento jev rušení. Pravděpodobně jediná možnost, jak se tohoto rušivého jevu vyvarovat, je měřit teplotu pouze při vypnutém napájení topného tělesa. Tímto způsobem se předejde rušivým potenciálům na vstupech měřicího obvodu termočlánku.

12 Řízení výkonu pájecího hrotu

12.1 Spínaný zdroj

Pro napájení topného tělesa pájecí stanice byl zvolen průmyslový spínaný napájecí zdroj **Mean Well RSP-200-24**. Tento zdroj poskytuje stabilní výstupní napětí 24 V s

maximálním proudem až 8,4 A a trvalým výstupním výkonem 201,6 W. Tento zdroj se vyznačuje vysokou účinností, spolehlivostí a robustností, což z něj činí vhodnou volbu pro napájení výkonových prvků, jako je i topná těleso v elektronických pájecích stanicích.

Tabulka 4 - Parametry MeanWell RSP-200-24 [28]

Parametr	Hodnota
Model	RSP-200-24
Výstupní napětí	24 V DC
Maximální výstupní proud	8,4 A
Maximální výstupní výkon	201,6 W
Vstupní napětí	88–264 V AC / 124–370 V DC
Účinnost	až 90 %
Pracovní teplota	–30 °C až +70 °C
Ochrany	proti přepětí, zkratu, přetížení a přehřátí
Rozměry	199 × 98 × 38 mm
Hmotnost	0,77 kg

12.1.1 Vlastnosti a výhody zdroje

Model RSP-200-24 je kompaktní nízko profilový průmyslový zdroj určené pro trvalý provoz. Zdroj obsahuje integrované ochrany proti přepětí, přetížení a přehřátí, které zvyšují bezpečnost a životnost připojených zařízení a samotného zdroje. Dále má široký rozsah vstupního napětí, což umožňuje napájení v různých podmínkách (sít' 230 V i 110 V). Vysoká účinnost zdroje až 90 %, zajišťuje nízké ztráty a minimální zahřívání i při vyšší zátěži. Možnost jemného doladění výstupního napětí v rozsahu $\pm 10\%$ pomocí trimru na desce zdroje. [28]

12.2 Spínací prvek PWM

Jako spínací prvek řídicí PWM byl zvolen MOSFET. Přesněji tranzistor **IRLZ44N**.

IRLZ44N je N-kanálový MOSFET, který je často používán pro řízení vysokých proudů v různých elektronických aplikacích, jako je například ovládání motorů, PWM řízení světel nebo napájecí obvody. Tento tranzistor je navržen tak, aby mohl být řízen logickým napětím 5V nebo 3,3V, což znamená, že je logicky spínáný. Jelikož je tranzistor takzvaně logický, je tedy vhodný pro použití přímo s mikrokontrolerem.

[29]

12.2.1 Parametry IRLZ44N

Maximální napětí (V_{ds}) je 55V. To znamená, že IRLZ44N může být použit pro aplikace, kde napětí mezi drain a source (V_{ds}) nepřesahuje 55V.

Maximální proud (I_d) je 47A (při teplotě 25°C). Tranzistorem může procházet vysoký proud až do 47A, při dostatečném chlazení.

R_{ds(on)} je 0.022 ohm (při $V_{gs} = 10V$). Toto je odpor mezi drain a source, když je tranzistor zapnutý. Nízký $R_{ds(on)}$ znamená nízké ztráty při přenosu energie a efektivní spínání, protože na vnitřním odporu dochází k tepelným ztrátám a tím i zahřívání samotného tranzistoru. Tento parametr je důležitý pro minimalizaci ztrát při přepínání.

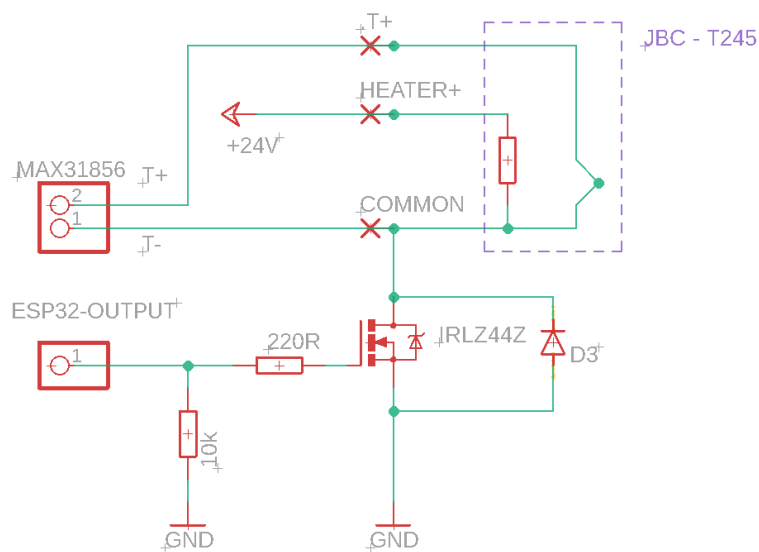
Gate prahové napětí ($V_{gs(th)}$) je 1-2V. Toto je napětí potřebné k tomu, aby tranzistor začal přenášet proud. Tranzistor má velmi nízké prahové napětí pro Gate, což znamená, že může být zapnutý i při nízkých napětích (5V nebo méně). To je výhoda pro řízení s logickými úrovněmi napětí (například z mikrokontroleru).

Gate kapacita je asi 1300 pF (při $V_{ds} = 25V$, $V_{gs} = 0V$). Gate kapacita určuje, jak rychle lze tranzistor spínat, protože kapacita gate musí být nabíjena nebo vybíjena při každém přepnutí. To ovlivňuje rychlost spínání. Tato hodnota je dostatečná pro spínání rychlé PWM. [29]

12.3 Spínání výkonového tranzistoru

Původně bylo uvažováno použití tranzistoru IRLZ44N ve funkci low-side spínače, tedy spínání zátěže (pájecího hrotu) vůči zemi. Tento postup je běžný při PWM řízení výkonu, protože řídicí signál (logická úroveň) přímo ovládá gate tranzistoru vůči pevně dané zemní referenci.

V této konstrukci pájecí stanice však vznikl zásadní problém, topné těleso a termočlánek v hrotu sdílí společný vývod. Pokud byl použit low-side spínač, při vypnutém tranzistoru byl společný kontakt hrotu na potenciálu +24V. Tím pádem se na referenčním vývodu termočláneku T- objevilo napětí zdroje, což zcela znehodnotilo měření teploty. Na výstupu SPI sběrnice do ESP32 se objevily chyby převodníku: NaN nebo zobrazení teploty -199,99°C.



Obrázek 18 - Původní zapojení Low-side spínač [Autor]

Pro zachování správného fungování termočláčku bylo nutné zajistit, aby při vypnutí topného tělesa byl společný kontakt na potenciálu blízkém zemi. Z těchto důvodů bylo rozhodnuto přejít na high-side spínání, tedy spínání přívodního napájení k hrotu, a ponechání společného vývodu blízko země.

Při high-side spínání se objevuje takový problém, že N-kanálové MOSFETy (včetně logických typů jako IRLZ44N) potřebují mít Gate napětí alespoň o několik voltů vyšší, než je napětí na Source. V případě spínání 24V musí být Gate tranzistoru napětí minimálně 28–30V, což přímo z ESP32 nelze zajistit (ESP32 poskytuje maximálně 3,3V). Tedy i když je IRLZ44N „logic-level“ tranzistor, není možné ho použít přímo pro high-side spínání bez dodatečné elektroniky. Z tohoto důvodu bylo nezbytné použít Gate driver nebo v češtině jako Hradlový budič nebo Budič FET.

12.3.1 Použití budiče pro high-side spínání

Pro řízení výkonového tranzistoru v režimu high-side byl použit driver **IR2104** od výrobce Infineon Technologies. IR2104 je gate driver (hradlový budič) v podobě Half-bridge (polo můstek). Polo můstky jsou schopné budit unipolární tranzistory v zapojení jako High side spínač a Low side spínač. [30]

Parametry IR2104:

- **Napájecí napětí (VCC):** 10 V až 20 V
- **Maximální napětí na high-side (VB–VS):** až 600 V
- **Vstupní logické napětí:** kompatibilní s logikou 3,3V i 5V (TTL/CMOS úrovně)
- **Výstupní proud:** až ±210 mA (schopnost rychle nabíjet/vybíjet gate kapacitu MOSFETu)
- **Ochrany:** Undervoltage lockout (UVLO) pro VCC i VB

Jednou z klíčových vlastností každého MOSFET driveru je jeho rychlost spínání, tedy jak rychle dokáže změnit stav výstupu (zapnout/vypnout MOSFET).

Pro IR2104 platí následující parametry:

- Typický čas náběhu (t_r): cca 80 ns
- Typický čas poklesu (t_f): cca 40 ns
- Typická šířka zpoždění (propagation delay): cca 120 ns

Čas náběhu (rise time) udává, jak rychle se výstupní signál zvýší z 10 % na 90 % konečné hodnoty.

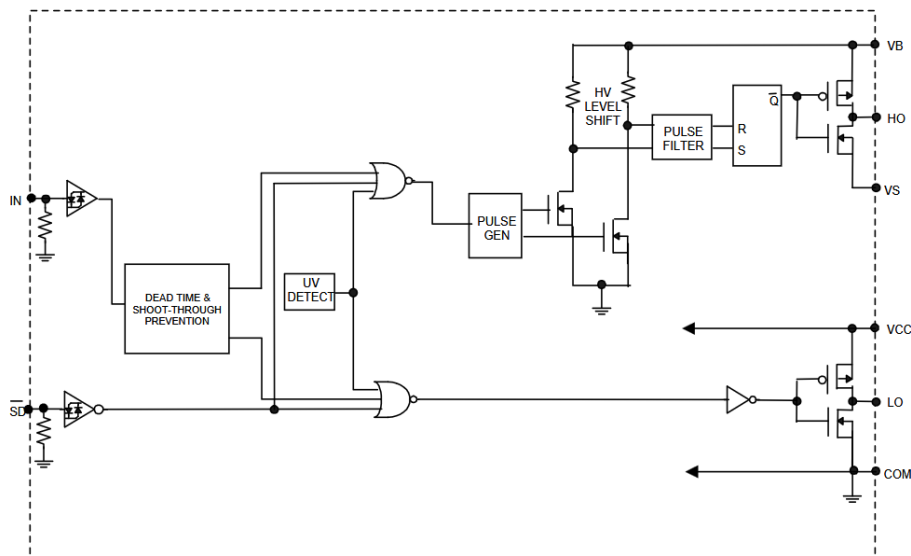
Čas poklesu (fall time) udává rychlost přechodu signálu zpět dolů z 90 % na 10 % hodnoty.

Propagační zpoždění znamená dobu od změny řídicího vstupu (IN) po změnu výstupu (HO).

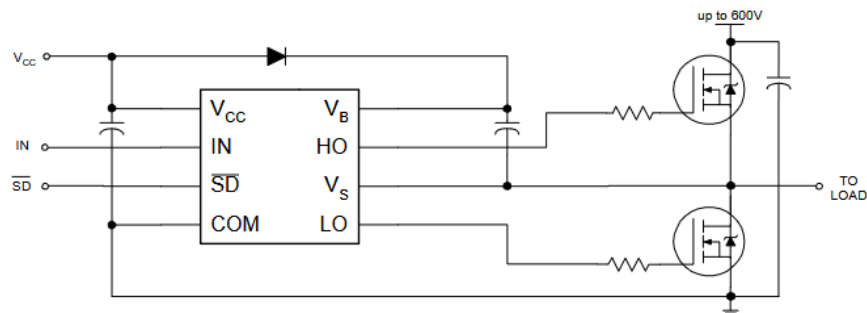
S časy náběhu a poklesu pod 100 ns a zpožděním kolem 120 ns je IR2104 dostatečně rychlý pro řízení MOSFETu v aplikacích s PWM frekvencemi v řádu jednotek až desítek kHz (běžně 10–100 kHz), důrazem na efektivní spínání bez výrazného ohřevu tranzistoru.

Funkce budiče:

ESP32 generuje PWM signál na vstup IN driveru IR2104. Driver podle tohoto signálu ovládá high-side MOSFET přes výstup HO. Díky bootstrap diodě a externímu bootstrap kondenzátoru si IR2104 vytváří potřebné vyšší napětí (VB) potřebné pro sepnutí N-kanálového MOSFETu v high-side zapojení. MOSFET tak dostává gate napětí vyšší než jeho source (o cca 10–12V), což je nezbytné pro úplné otevření kanálu a nízký odpor v sepnutém stavu.



Obrázek 19 - IR2104 Blokové schéma [30]



Obrázek 20 - IR2104 Typické zapojení [30]

Při pohledu na blokové schéma IR2104 je zřejmé, že Výstupy HO (high-side) a LO (low-side) nejsou otevřené kolektory nebo čisté spínače, ale mají za sebou aktivní výstupní budiče tvořené dvěma MOSFETy – párovým P-kanálovým a N-kanálovým tranzistorem (v angličtině „push-pull“ výstupní stupeň).

Každý výstupní tranzistor má za úkol buď nabíjet gate (přes horní P-MOSFET), nebo vybíjet gate (přes dolní N-MOSFET). Při sepnutí horní tranzistor spojí gate s napájecím napětím (VB), rychle nabije gate MOSFETu. Při rozepnutí dolní tranzistor spojí gate s potenciálem source (VS) a gate se aktivně vybije na nízký potenciál.

Díky tomu nedochází k "plovoucímu stavu" gate, když je PWM na nule. **Není potřeba externí pull-down rezistor**, který by gate stáhnul k zemi jako u klasického jednoduchého MOSFETu. Díky tomu je spínání rychlé a ostré, které by jinak způsobovaly problémy (např. zahřívání tranzistoru). Pull-down rezistor je u běžných zapojení MOSFETu nutný pro rychlejší vybíjení Gate kapacity, která může držet tranzistor otevřený i několik sekund. [30]

13 Zobrazení hodnot

Pro návrh pájecí stanice je nezbytný způsob zobrazení aktuálních hodnot. Zobrazení hodnot umožňuje uživateli efektivní kontrolu nad procesem pájení.

13.1 Požadavky na zobrazení hodnot

Displej by měl být dobře viditelný i v různých světelných podmínkách. Aktuální teplota hrotu se musí zobrazovat v reálném čase, musí být rychlá odezva. Uživatel by měl snadno identifikovat nastavené i aktuální hodnoty, zobrazení hodnot by mělo být přehledné. V prostředí s vysokofrekvenčním rušením musí být zajištěna stabilita zobrazovaných údajů, displej by měl být odolný vůči elektromagnetickému rušení a zároveň do nějaké míry i mechanicky odolný a správně umístěný.

13.2 Zobrazované hodnoty

Na displeji pájecí stanice se typicky zobrazují následující parametry:

- **Aktuální teplota hrotu** (např. 350 °C).
- **Nastavená teplota** (hodnota zadaná uživatelem).
- **Režim stanice** (např. standby, boost, kalibrace).
- **Stav ohřevu** (indikace aktivního ohřevu).
- **Chybové hlášení** (např. přerušení termočlánku, vadný hrot).
- **Časovač a statistiky** (např. doba od poslední aktivace).

Některé z uvedených parametrů nejsou nezbytné, důležité jsou však parametry: Aktuální teplota hrotu a Nastavená teplota.

13.3 Typy displejů používané v pájecích stanicích

Sedmisegmentové LED displeje

- Používají se v jednoduchých pájecích stanicích.
- Zobrazují pouze číselné hodnoty.
- Omezená možnost zobrazení dalších informací.

Alfanumerické LCD displeje (např. 16x2, 20x4)

- Zobrazují textové informace (např. "Teplota: 350 °C").
- Nižší spotřeba energie oproti LED.
- Podsvícení zlepšuje čitelnost.

Grafické LCD displeje

- Umožňují zobrazení složitějších grafických prvků.
- Vhodné pro vizualizaci teplotních křivek a stavů systému.
- Vyšší spotřeba a složitější řízení.

OLED displeje

- Vysoký kontrast a čitelnost z různých úhlů.
- Rychlá odezva, vhodná pro dynamické zobrazení hodnot.
- Používány u moderních digitálních pájecích stanic.

Dotykové displeje

- Integrují ovládání a zobrazení do jednoho prvku.
- Používány v profesionálních a prémiových modelech.
- Vyšší cena a náročnost implementace.

Pro běžné aplikace je optimální grafický OLED displej, který nabízí dobrý kontrast, rychlou odezvu a možnost zobrazování různých informací na malé ploše.

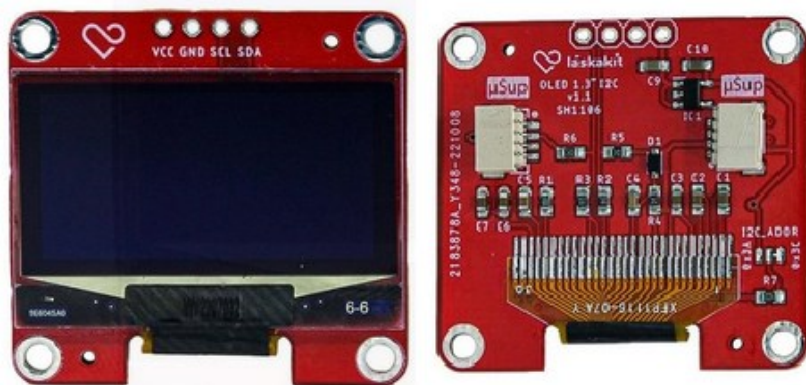
Pro profesionální pájecí stanice mohou být použity dotykové TFT displeje, které umožňují pokročilé interakce a detailní vizualizaci dat. Naopak u jednoduchých konstrukcí pájecích stanic často postačuje LED indikátor teplotního režimu nebo základní sedmi segmentový displej.

13.4 Volba displeje pro pájecí stanici

Pro tuto pájecí stanici byl zvolen OLED displej SH1106. Tento displej poskytuje vysoký kontrast, široké pozorovací úhly a nízkou spotřebu energie. Displej komunikuje s mikrokontrolerem prostřednictvím I2C sběrnice. Využívá pouze dva vodiče, což z ní dělá jednoduché a efektivní řešení pro přenos dat mezi mikrokontrolerem a periferií.

Rozlišení displeje je 128 × 64 bodů. Napájecí napětí je 3,3 V–5 V. Velikost aktivní plochy je přibližně 2,42”.

Pro řízení displeje v ESP32 se běžně používají knihovny jako U8g2 nebo Adafruit SSD1306 (kompatibilní s SH1106). Výpis teploty a dalších parametrů lze aktualizovat v reálném čase s minimální latencí. [31]



Obrázek 21 - OLED display – SH1106 [31]

14 Nastavení parametrů

Pro nastavení parametrů pájecí stanice byl zvolen rotační enkodér. Rotační enkodér je elektromechanický převodník, který převádí úhlovou polohu nebo pohyb otočné hřídele na elektrický signál. V oblasti vestavěných systémů a automatizace se používá jako ovládací prvek nebo senzor k detekci směru, rychlosti a relativní či absolutní polohy. Díky své mechanické konstrukci umožňuje nekonečné otáčení, čímž se liší od běžných analogových prvků, jako jsou potenciometry.

Z hlediska funkce se rotační enkodéry dělí na **inkrementální** a **absolutní**. Inkrementální enkodér generuje pulzy při každém pootočení hřídele, přičemž směr otáčení lze určit ze vzájemného fázového posunu dvou signálových kanálů označovaných jako A a B. Tyto impulzy slouží k odvození rychlosti nebo změny polohy, nikoliv však absolutní pozice. Po vypnutí napájení zařízení „zapomene“ svou předchozí polohu. Naproti tomu absolutní enkodér přiděluje každé poloze unikátní binární nebo Grayův kód, který jednoznačně identifikuje aktuální úhel, a to i po opětovném zapnutí zařízení.

Z hlediska výstupu poskytují rotační enkodéry zpravidla digitální signály – konkrétně obdélníkové pulzy. Některé typy rovněž obsahují integrovaný tlačítkový spínač aktivovaný axiálním stiskem hřídele. Tento vstup se často využívá pro potvrzování výběrů v uživatelském rozhraní. [32]

14.1 Použití rotačního enkodéru

V této práci je rotační enkodér použit jako hlavní ovládací prvek pro nastavování parametrů pájecí stanice, zejména teploty hrotu. Enkodér je připojen k mikrokontroleru ESP32 a jeho impulzy jsou zpracovávány. Výhodou tohoto řešení je intuitivní ovládání, odolnost vůči opotřebení a možnost zajištění jemného rozlišení nastavení.



Obrázek 22 - Rotační enkodér modul [33]

15 Napájení mikrokontroleru a budiče

Napájení jednotlivých částí pájecí stanice je řešeno prostřednictvím lineárních stabilizátorů, které převádějí vstupní napětí ze zdroje (24 V) na potřebné napěťové úrovně pro jednotlivé komponenty.

15.1 Větev 5V – napájení logiky

Z 24V napájecího zdroje je pomocí lineárního stabilizátoru 7805 napětí 5 V, které slouží k napájení nízkonapěťové logiky: ESP32 mikrokontroler, OLED displej (SH1106), modul rotačního enkodéru.

Lineární stabilizátor je jednoduchá tři vývodová součástka s jednoduchým zapojením. Stabilizátor je sice konstrukčně jednoduchý, ale při velkém rozdílu vstupního a výstupního napětí (24 V → 5 V) generuje značné ztrátové teplo. Při odběru například 150 mA je výkonová ztráta:

$$P_{ztráta} = (24V - 5V) \cdot 0,15A = 2,85W \quad (15.1)$$

To způsobuje zahřívání stabilizátoru. Z hlediska účinnosti by bylo vhodnější uvažovat o nahrazení lineárního stabilizátoru spínaným měničem (např. MP1584 nebo LM2596), který by při stejném výkonu produkoval řádově menší ztráty.

15.2 Větev 12V – budič MOSFETu

Budič IR2104, použitý k řízení výkonového tranzistoru v high-side zapojení, je napájen opět 12V lineárním stabilizátorem 7812, z 24V větve. Důvodem je potřeba vytvořit dostatečný rozdíl mezi gate a source napětím spínaného N-kanálového MOSFETu, který jinak nelze plně otevřít.

15.3 Větev 3,3V – termočlánek

Pro převodník termočlánek MAX31856 je použito napájení přímo z výstupu 3,3V pinů mikrokontroleru ESP32. Důvodem použití 3,3 V je kompatibilita obvodu MAX31856 – vyšší napětí (např. 5 V) by mohlo vést k jeho poškození.

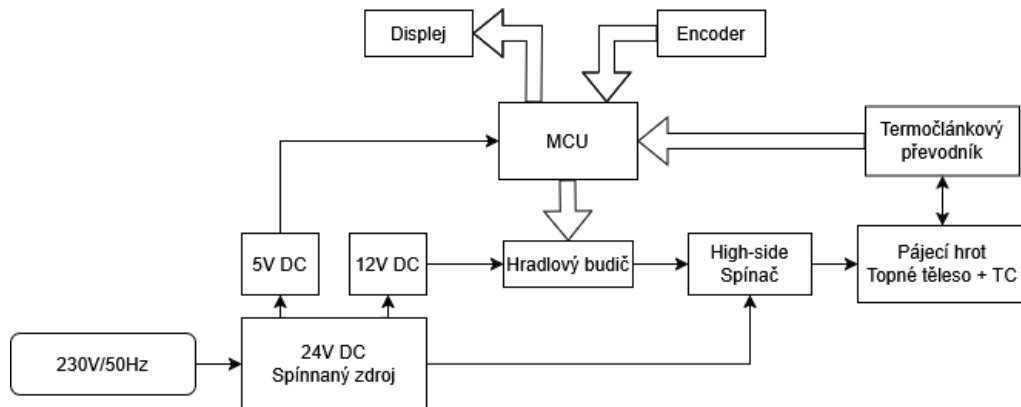
15.4 Zhodnocení napájecího řešení

Použití lineárních stabilizátorů umožnilo jednoduchý návrh bez potřeby vysokofrekvenčních komponent, ale má svá omezení: Vysoké ztráty a zahřívání na 5V a 12V větvi, nízká účinnost při převodu z 24V, externí chlazení lineárního stabilizátoru.

Do budoucna by bylo vhodné napájecí část upravit pomocí účinnějších spínaných měničů.

16 Postup konstrukce pájecí stanice

Při postupu konstrukce pájecí stanice je po zvolení jednotlivých funkčních částí vhodné navrhnout blokové schéma celého řetězce.



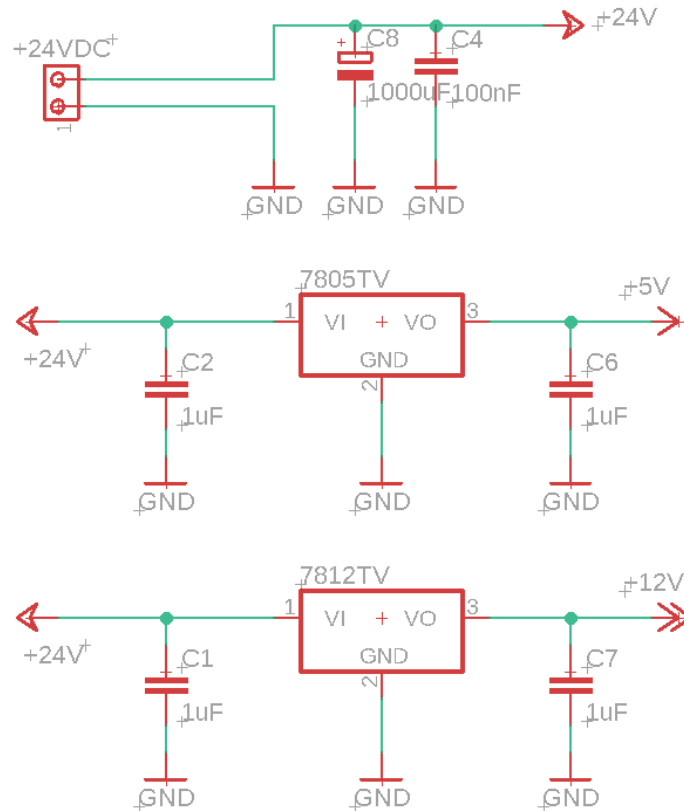
Obrázek 23 - Blokové schéma pájecí stanice [Autor]

Rekapitulace použitých komponent pájecí stanice:

- Spínaný zdroj – Mean Well RSP-200-24
- 5VDC stabilizátor – 7805, pouzdro TO-220
- 12VDC stabilizátor – 7812, pouzdro TO-220
- MCU – ESP32 mini
- Displej – OLED modul SH1106
- Enkodér – Rotační enkodér modul
- Termočlánkový převodník – MAX31856 modul
- Hradlový budič – IR2104, pouzdro DIL8
- High-side spínač – IRLZ44N, pouzdro TO-220
- Pájecí hrot – JBC C245

17 Návrh obvodu

17.1 Napájecí část



Obrázek 24 - Schéma napájecí části [Autor]

Na obrázku (Obrázek 24) je znázorněno schéma napájecí části pájecí stanice. Celý systém je napájen z externího 24V spínaného zdroje (Mean Well RSP-200-24), který je přiveden přes dvoupólový konektor. Za vstupem jsou zařazeny filtrační kondenzátory C8 (1000 μ F). Kapacita 1000 μ F poskytuje dostatečnou rezervu pro kompenzaci poklesů napětí při náhlém odběru proudu a rázů spínání PWM. C4 (100 nF) pro vyhlazení a potlačení vysokofrekvenčního rušení.

Z hlavní 24V větve jsou poté odvozeny dvě stabilizované napěťové větve pomocí lineárních stabilizátorů 7805 a 7812 v pouzdrech TO-220:

Stabilizátor 7805 (5V výstup)

- Vstup: 24 V přes kondenzátor C2 (1 μ F)
- Výstup: 5 V přes kondenzátor C6 (1 μ F)
- Napájí: ESP32, OLED displej, rotační enkodér

Doporučená hodnota kapacit pro stabilizátory řady 78xx je 1 μ F. Použity jsou keramické kondenzátory, jak na vstupu, tak na výstupu.

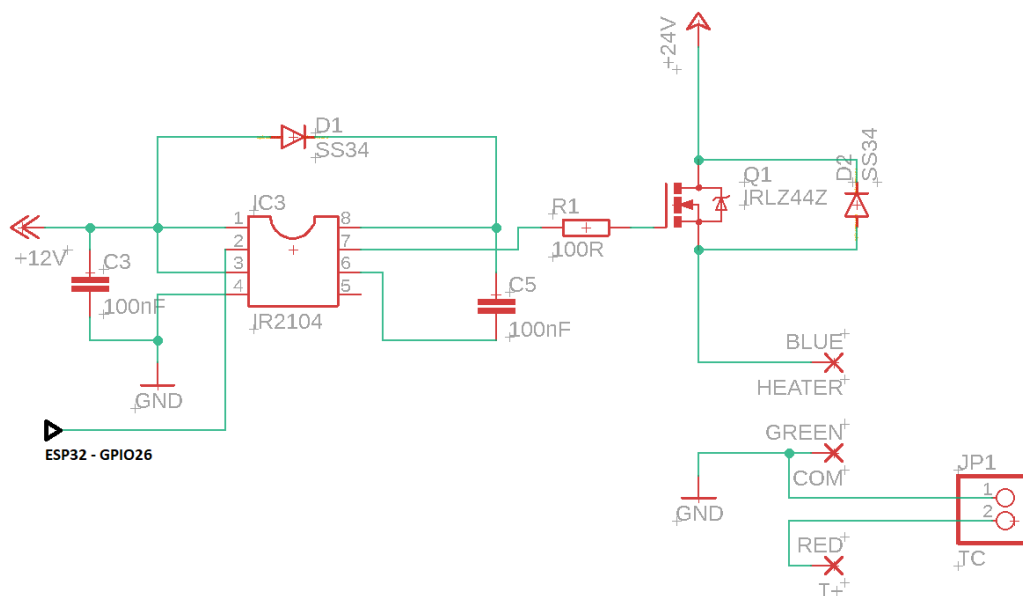
Tato větev je relativně silně zatížená a při vysokém rozdílu napětí (24 V → 5 V) dochází k výrazné tepelně-výkonové ztrátě, která vyžaduje chlazení stabilizátoru.

Stabilizátor 7812 (12V výstup)

- Vstup: 24 V přes kondenzátor C1 (1 μ F)
- Výstup: 12 V přes kondenzátor C7 (1 μ F)
- Napájí: MOSFET budič IR2104

Tato větev má velmi nízký proudový odběr, protože driver spotřebovává proud pouze při spínání hradla výkonového tranzistoru. Stabilizátor se tak téměř nezahřívá.

17.2 Výkonová část - řízení ohřevu pájecího hrotu



Obrázek 25 – Schéma výkonové části [Autor]

Na obrázku (Obrázek 25) je znázorněno schéma řízení topného tělesa pájecího hrotu JBC C245 pomocí výkonového N-kanálového MOSFETu IRLZ44N, který je řízen budičem IR2104 ve funkci high-side driveru.

Tato konfigurace byla zvolena z důvodu konstrukce samotného hrotu, kde termočlánek a topné těleso sdílejí společný vývod (COM). Aby nedocházelo ke zkreslení nebo ovlivnění měření teploty termočláneku, bylo nutné provést spínání na straně +24 V (high-side).

IR2104 – budič výkonového tranzistoru

- Napájen ze stabilizované větve +12 V
- Vstup IN (pin 2) přijímá PWM signál z ESP32 (GPIO26)
- Výstup HO (pin 7) ovládá gate tranzistoru IRLZ44N

- Bootstrap kondenzátor C5 umožňuje vytvořit vyšší napětí na gate ($V_B > V_S$) (100 nF) je doporučená hodnota pro rychlé PWM spínání (např. 10–50 kHz), hodnota nesmí být příliš malá (nedostatek náboje), ani příliš velká (pomalé nabíjení)
- Dioda D1 (SS34) je součástí bootstrap obvodu, nabíjí C5. Rychlá dioda s nízkým úbytkem napětí, vhodná pro vysokofrekvenční spínání
- Kondenzátor C3 (100 nF), základní blokáce napěťových špiček a rušení z napájení – 100 nF keramika je standardně doporučovaná hodnota.

MOSFET IRLZ44N

- Spíná napájecí napětí 24 V do výhřevného tělesa hrotu
- Gate je řízen přes rezistor R1 (100 Ω) z výstupu budiče, omezuje proud při náběžné hraně (nabíjení gate kapacity), potlačuje oscilace a zamezuje rušení
- Paralelně k tranzistoru je zapojena ochranná Schottky dioda D2 (SS34) proti přepětí (flyback), způsobeným vypínáním indukční zátěže (topné těleso pájecího hrotu) SS34 je rychlá dioda s nízkým úbytkem napětí, vhodná pro vysokofrekvenční spínání

Konektor rukojeti T245

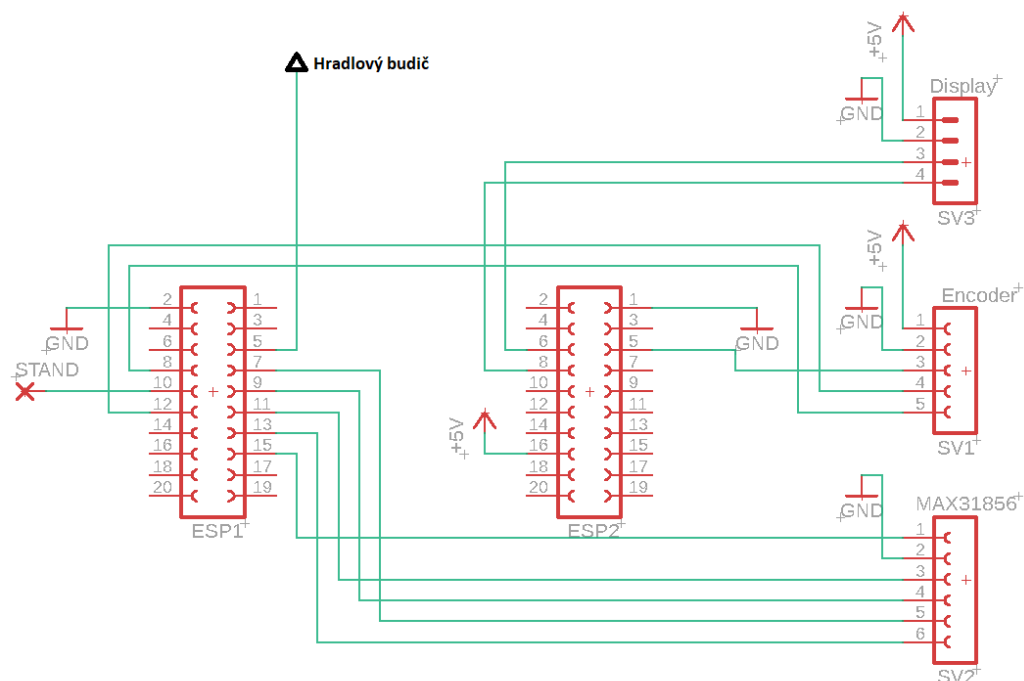
Originální konektor rukojeti JBC-T245 byl nahrazen konektorem GX12-6-z (mikrofonní zásuvka 6pin). Nahrazen byl z důvodu nedostupnosti protikusu konektoru. Nový konektor splňuje veškeré požadavky originálního konektoru. Barva vodičů a zapojení vodičů v konektoru bylo zachováno.

BLUE (HEATER) – výstup na topné těleso pájecího hrotu

RED (T+) – signál z termočlánku pájecího hrotu připojen k převodníku MAX31856

GREEN (COM) – společný vývod pro termočlánek T- a GND

17.3 Řídicí část – zapojení mikrokontroleru a periferií



Obrázek 26 - Zapojení mikrokontroleru a periferií [Autor]

Na schématu je znázorněno zapojení mikrokontroleru ESP32 Mini a jeho propojení se třemi hlavními periferními moduly: OLED displej (SH1106), Rotační enkodér s tlačítkem, termočlánekový převodník MAX31856

ESP32 je v návrhu reprezentováno dvěma konektory (ESP1 a ESP2), které dohromady tvoří rozhraní k modulu osazenému na DPS.

Moduly (displej a enkodér) jsou napájeny z 5V větve, která je vytvořena stabilizátorem 7805. ESP32 je také napájeno 5V. Převodník MAX31856 je napájen 3,3 V z pinu ESP32 (3,3V).

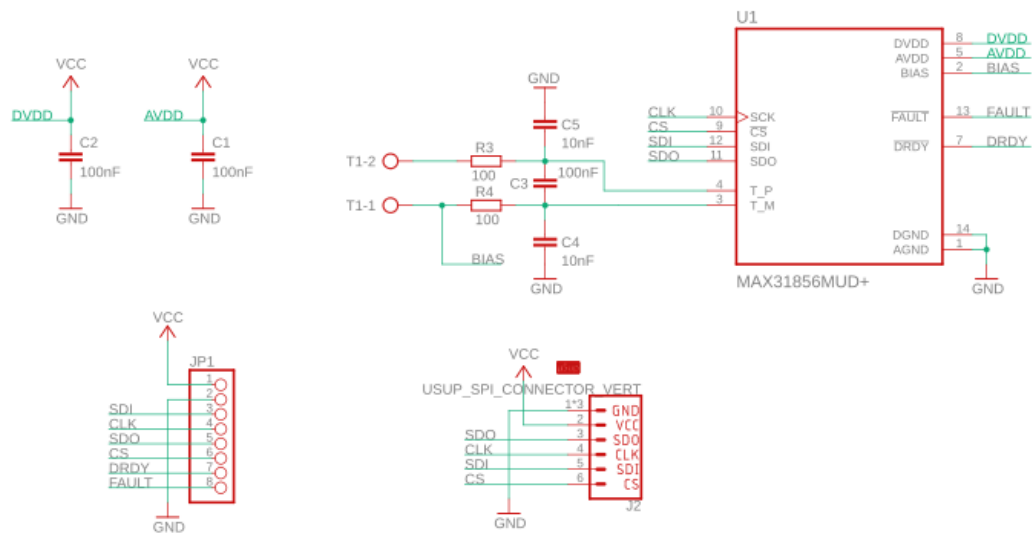
17.3.1 Rotační enkodér – SV1

- CLK (impulzní výstup) → GPIO34
- DT (směr otáčení) → GPIO35
- SW (tlačítko) → GPIO25

17.3.2 Termočlávkový převodník – MAX31856 – SV2

- Komunikace přes SPI
- MISO (SO) → GPIO19
- MOSI (SI) → GPIO23
- SCK → GPIO18
- CS (chip select) → GPIO5

Modul je napájen z výstupu 3,3 V z ESP32, protože logické úrovně MAX31856 nejsou 5V tolerantní.

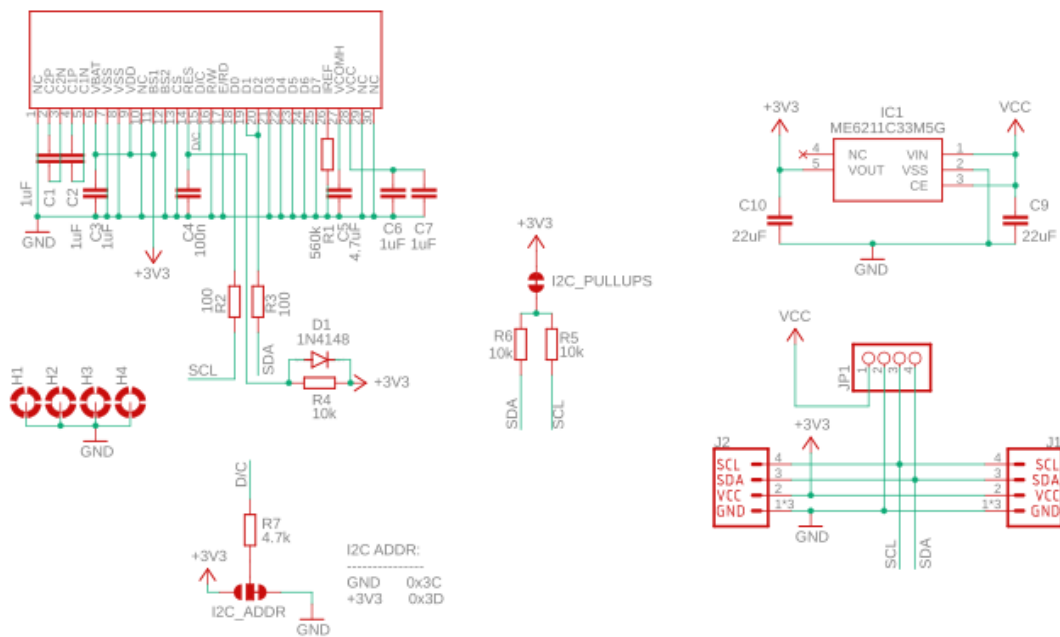


Obrázek 27 – Schéma převodníku MAX31856 [34]

17.3.3 OLED displej – SV3

Komunikace přes I2C sběrnici

- SDA → GPIO21
- SCL → GPIO22
- Napájení: +5 V



Obrázek 28 - Schéma modulu OLED I2C displej [35]

17.3.4 Sleep senzor – STAND pin

- Připojeno na GPIO33
- Slouží pro detekci odložení hrotu do stojanu → aktivuje standby režim
- Logika: LOW = odloženo (STBY), HIGH = pracuje (RUN)

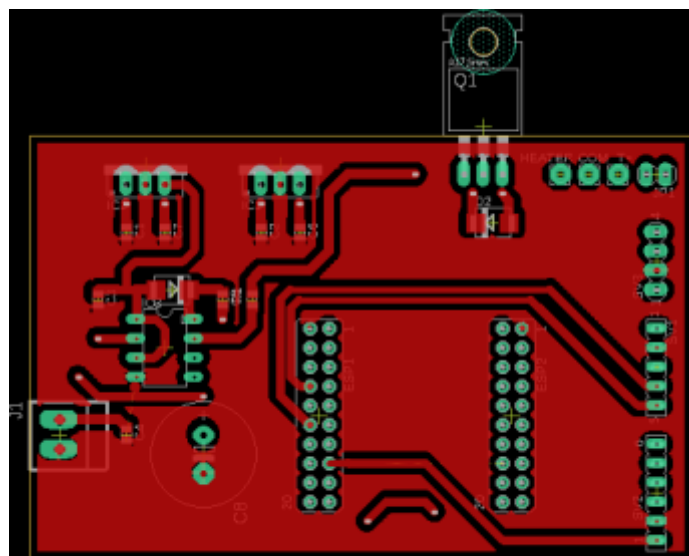
V programu se podle tohoto pinu dynamicky mění cílová teplota

17.3.5 Výstup PWM signálu – řízení výkonu

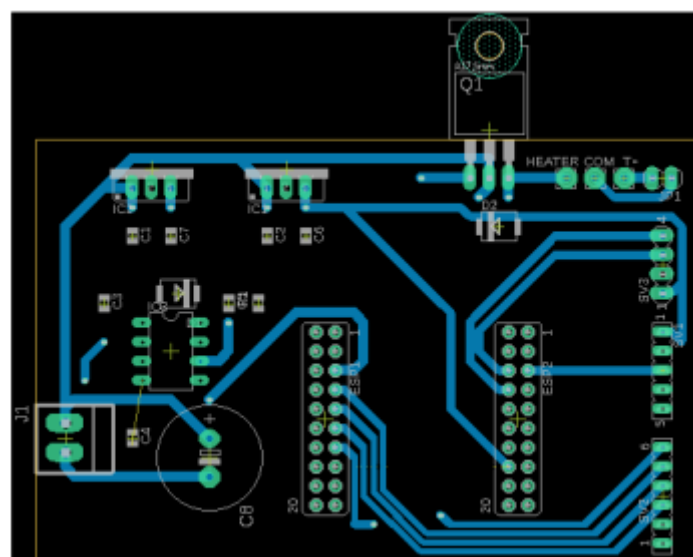
- GPIO26 je vyvedeno jako výstup PWM signálu pro řízení budiče IR2104 (napájení topného tělesa)
- Tento signál je řízen na základě výstupu z PID regulace

18 Návrh DPS

Další významnou částí návrhu pájecí stanice je návrh DPS. DPS byla navržena ve vývojovém prostředí Autodesk EAGLE 9.5.1. Na následujících obrázcích jsou vyobrazeny vrstvy DPS. Pro návrh byla použita dvouvrstvá deska. První prototypní deska byla vytvořena metodou nažehlení toneru z tiskárny přes lesklý papír a dále leptána chloridem železitým.



Obrázek 29 - Horní vrstva DPS [Autor]



Obrázek 30 - Spodní vrstva DPS [Autor]

19 Návrh a konstrukce krytu

Návrh krytů pájecí stanice je za účelem použitelnosti, ochraně součástí před mechanickým namáháním a za účelem vzhledu zařízení. Návrh krytů a stojanu byl vytvořen v 3D návrhovém prostředí FreeCAD 1.0. Při návrhu bylo dbáno na funkčnost finálních dílců, správné rozměry a jednoduchost. Celý tento návrh je rozdělen do více částí.

1. Kryt napájecího zdroje – Kryt napájecího zdroje je navrhnut ze dvou dílců. Kryt neobepíná celé tělo zdroje, z důvodu zachování otvorů pro cirkulaci vzduchu a chlazení zdroje. Důležitá část však je, zakrýt svorky zdroje před nahodilým dotykem. Takto zakrytovaný zdroj pak tvoří základnu pro další části návrhu

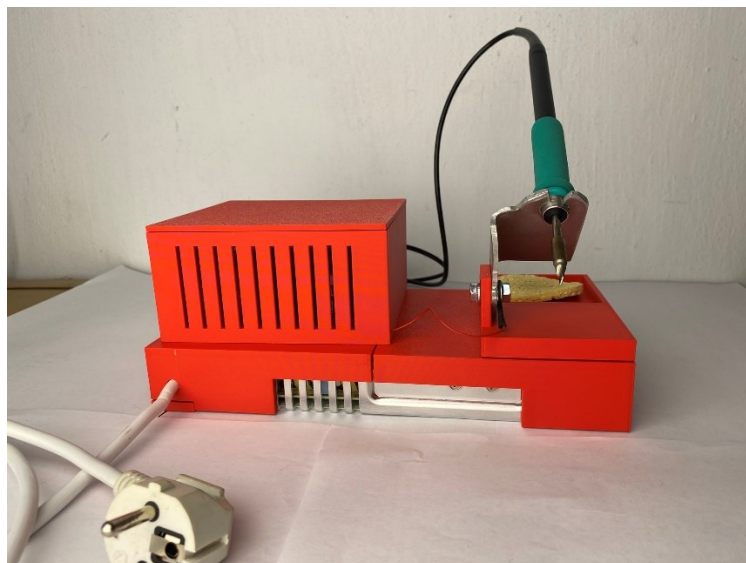
2. Krabíčka základové stanice – Krabíčka základové stanice je ve tvaru kvádrů. V krabíčce je umístěna deska plošného spoje a na pohledovou stěnu krabíčky je umístěn displej, rotační enkodér a konektor pro rukojeť s pájecím hrotem. Krabíčka má shora víko a na zadní stěně žebrování za účelem cirkulace vzduchu.

3. Stojan pájecího hrotu – Stojan pro odkládání hrotu je umístěn na levém kraji napájecího zdroje. Stojan je tvořen ze dvou částí, první část je místo pro odkládání pájecího hrotu. Tato část je z vodivého materiálu, hliníku, z důvodu kontaktu pro snímání odložení hrotu. Tato část je připevněna k základně, na které je i prohlubeň pro houbičku na čištění pájecího hrotu.

Konstrukce krytu byla po návrhu vytvořena pomocí metody 3D tisku z umělé hmoty.



Obrázek 31 - Vzhled finální pájecí stanice přední část [Autor]



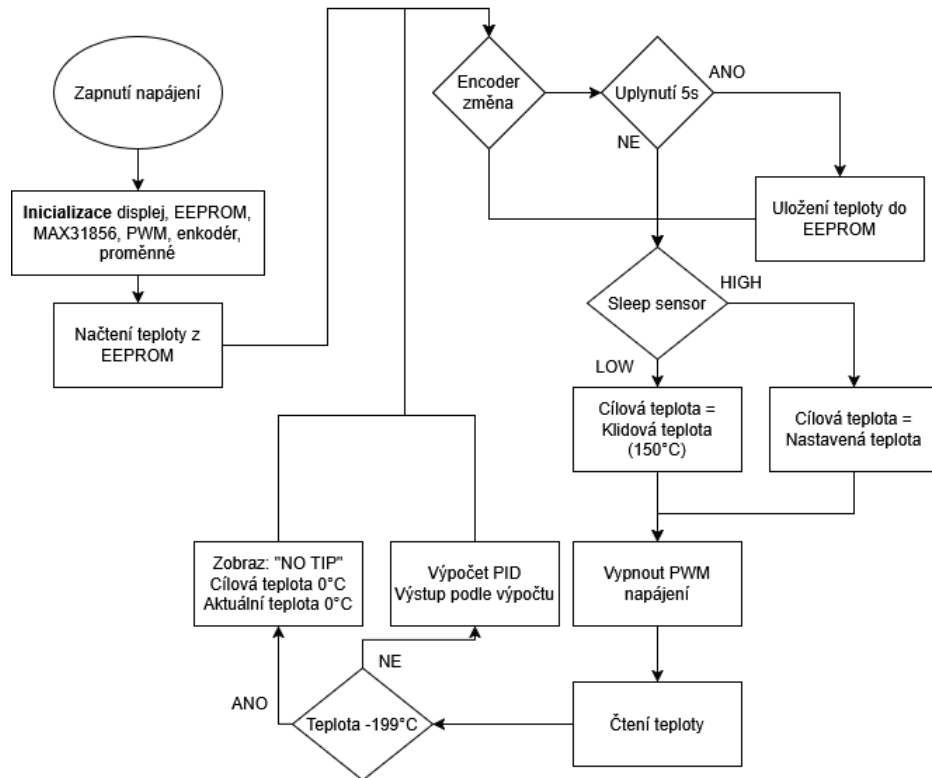
Obrázek 32 - Vzhled finální pájecí stanice zadní část [Autor]

20 Popis a funkce programu

Řídicí program mikrokontroleru ESP32 zajišťuje kompletní správu pájecí stanice. Je napsán v jazyce C++ v prostředí Visual Code – PlatformIO.

Program cyklicky: Měří aktuální teplotu hrotu pomocí termočlánku v hrotu a převodníku MAX31856, vyhodnocuje, zda je páječka ve stojánku (standby režim), podle režimu a nastavení vypočítává cílovou teplotu, řídí výstupní výkon pomocí PWM signálu (PID regulace), zobrazuje hodnoty na OLED displeji (teplota, režim), umožňuje uživateli nastavit cílovou teplotu pomocí rotačního enkodéru.

Na obrázku (Obrázek 33) je zobrazen blokový diagram funkce programu pájecí stanice. Po zapnutí zařízení nejprve proběhne inicializace hardwaru. ESP32 nastaví všechny potřebné periferie: komunikace s displejem (I2C), inicializace termočládkového převodníku MAX31856 (SPI), příprava PWM výstupu pro řízení výkonu, nastaví piny pro čtení rotačního enkodéru a senzoru stojanu (STAND). Z EEPROM se načte poslední uložená hodnota cílové teploty, aby se po restartu zachovalo nastavení.



Obrázek 33 - Blokový diagram programu [Autor]

Následuje hlavní smyčka programu (loop()), která probíhá nepřetržitě a má tyto hlavní části:

1. Nastavení teploty

Uživatel pomocí rotačního enkodéru nastavuje požadovanou teplotu hrotu. Enkodér generuje pulzy a směr otáčení, které mikrokontroler vyhodnocuje přes přerušení na pinu. Každým krokem se teplota mění o ± 5 °C. Po změně je nová teplota uložena do EEPROM (paměť, která přetrvává i po vypnutí), ale až s prodlevou 5 sekund – tím se výrazně prodlužuje životnost EEPROM, která má omezený počet zápisů.

2. Detekce režimu RUN / STANDBY

Program průběžně kontroluje stav senzoru STAND.

Pokud je hrot ve stojanu (pin připojen k zemi, LOW, přes pájecí hrot), přepne se do režimu STBY a cílová teplota se sníží na 150 °C.

Pokud je hrot zvednut (pin je ve stavu HIGH), program přepne zpět do režimu RUN a topí na uživatelem nastavenou teplotu.

3. Měření aktuální teploty

Před každým měřením program vypne PWM výstup, aby nedocházelo k ovlivnění termočlánku špičkami z výkonové části. Po 50 milisekundách je teplota přečtena.

Pokud převodník vrátí hodnotu $-199\text{ }^{\circ}\text{C}$, jedná se o chybu, odpojený nebo vadný hrot. Program tuto situaci vyhodnotí, topení se vypne a na displeji se zobrazí hláška „NO TIP“ (Chybí hrot).

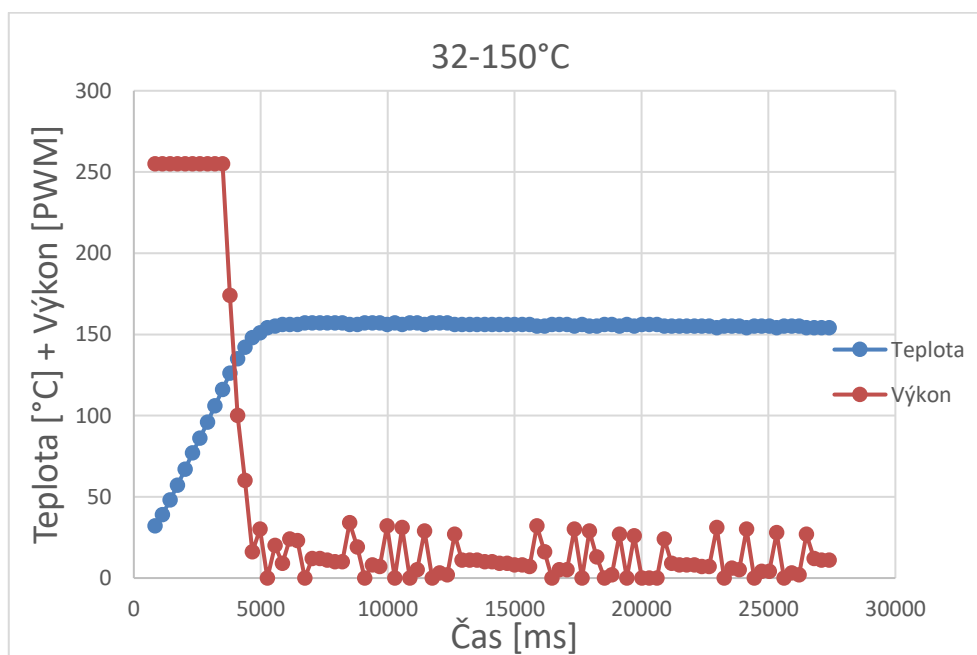
4. PID regulace a řízení ohřevu

Jakmile je k dispozici aktuální teplota a známá cílová, předá se tato dvojice do PID regulátoru, který vypočítá výstupní hodnotu.

Tato hodnota se převede na 8bitovou PWM (rozsah 0–255) a použije se k ovládání budiče IR2104 a tranzistoru IRLZ44N, který spíná topné těleso.

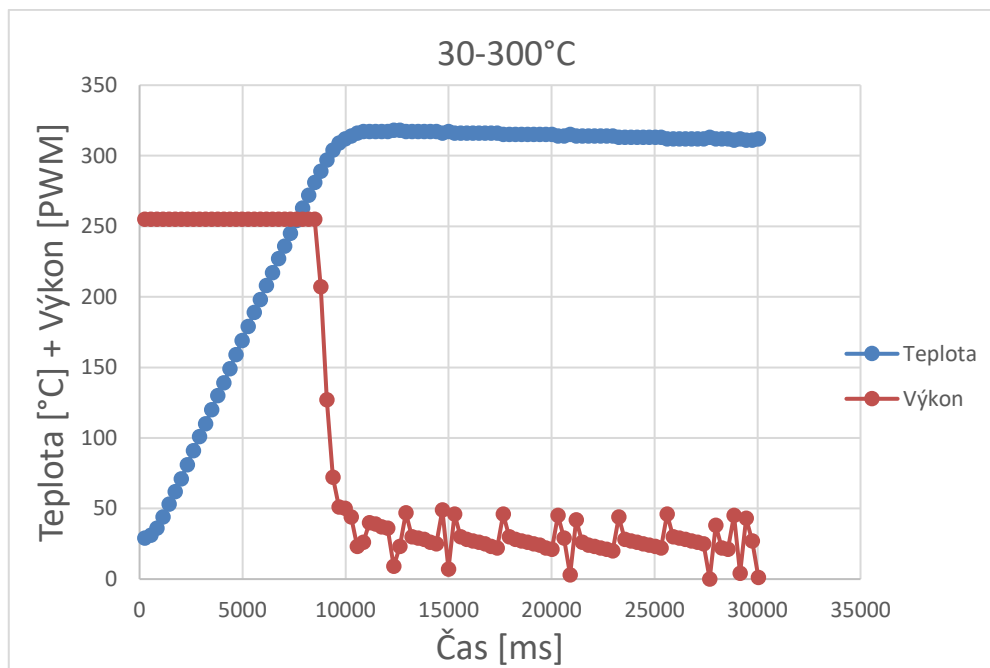
21 Testování pájecí stanice

Po konstrukci pájecí stanice bylo zařízení podrobena některým testům. První test spočíval v testování rychlosti nahřátí pájecího hrotu na požadovanou teplotu. Nejprve se měřil čas nahřátí na Stand-by, klidovou teplotu, ta je $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na grafu lze sledovat, že nahřátí trvalo necelých 5s.



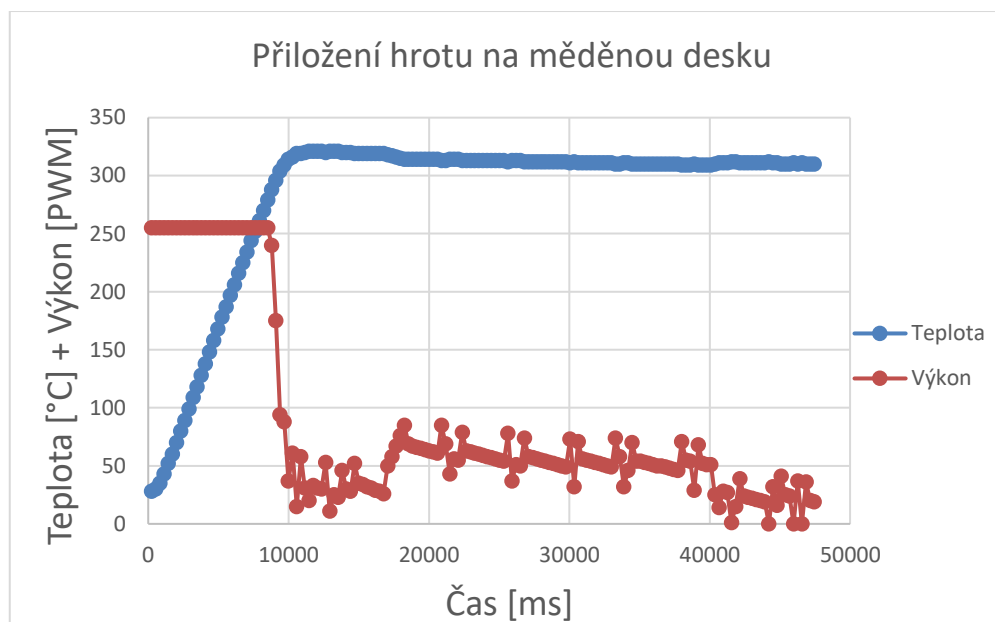
Obrázek 34 - Čas nahřátí na Stand-by teplotu [Autor]

Na dalším obrázku je zobrazen graf času nahřátí hrotu na teplotu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.



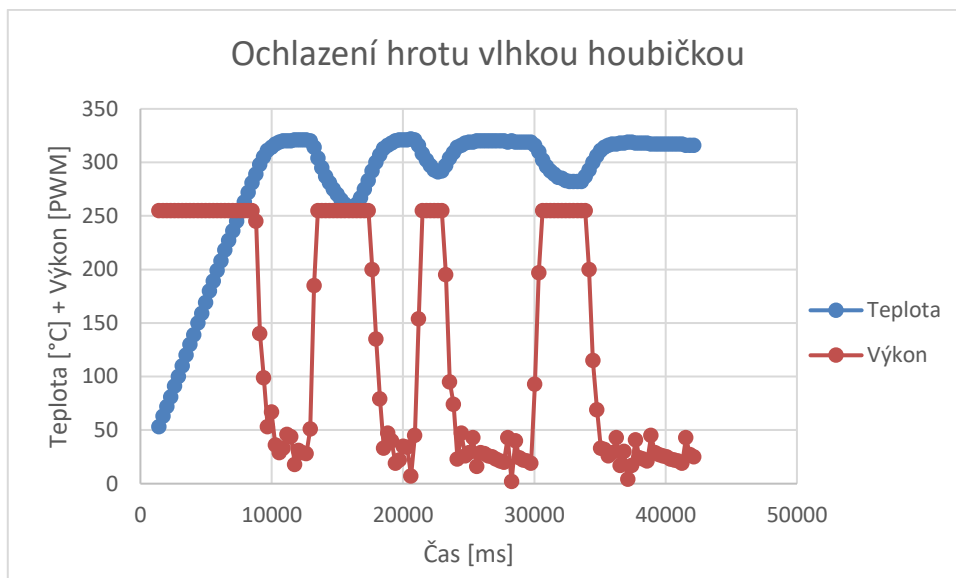
Obrázek 35 - Čas nahřátí na teplotu 300°C [Autor]

Další test spočíval v ochlazování pájecího hrotu. První druh ochlazení byl přiložením pájecího hrotu na měděnou desku přibližně 20x20 cm. Na grafu jsou zobrazeny dva průběhy, Teplota a Výkon zobrazený jako hodnota výstupního PWM signálu. Lze sledovat, že teplota klesla neznatelně asi o 1°C. Na průběhu PWM lze sledovat mírný nárůst výkonu.



Obrázek 36 - Ochlazení pájecího hrotu na měděné desce [Autor]

Na dalším grafu je zobrazen průběh při ochlazení pájecího hrotu vlhkou houbičkou, která se používá na čištění pájecího hrotu. Na průběhu lze sledovat, že teplota mírně klesne, ale z teploty přibližně 280 °C zpět na teplotu 315 °C trvalo necelé 2s.



Obrázek 37 - Ochlazení pájecího hrotu vlhkou houbičkou [Autor]

Závěr

Cílem této práce byl návrh a konstrukce funkční pájecí stanice za použití průmyslově vyráběného hrotu. Teoretická část byla zaměřena na metody pájení, zařízení a materiály používané při pájení. Dále se věnovala blíže mikro pájecí stanici. Byly zmíněny možnosti napájení pájecích stanic a možnosti regulace výkonu na pájecích hrotech. V této části byly také rozebrány teoretické možnosti měření teploty se zaměřením na metody použitelné v pájecích stanicích.

V praktické části byly popsány zvolené části pájecí stanice a z těchto částí proveden návrh. Návrh sestával z tvorby programu pro mikrokontroler, schémat, návrhu desky plošného spoje a návrhu krycích částí zařízení. Po návrhu bylo zařízení sestrojeno a prověřeno různými testy.

Finální pájecí stanice je funkčním zařízením, které je připraveno k využití. Pájecí stanice je intuitivní a jednoduchá na užívání, s použitím OLED displeje a rotačního enkodéru působí moderně. Pájecí hrot je výkonný a doba nahřátí na požadovanou teplotu je velmi rychlá oproti běžným pájecím stanicím. Při prudkém zchlazení pájecího hrotu, například otěrem o vlhkou houbičku za účelem očištění, dojde k opětovnému nahřátí velmi rychle.

Zařízení má však i své nedostatky, mezi které patří například: přestřel regulace teploty při prvotním nahřátí, nebo slyšitelné spínání tranzistoru z důvodu nevhodně zvolené frekvence spínání.

Literatura

- [1] AUTOR, Nenalezený. Rozdíl mezi svařováním a tvrdým a měkkým pájením. Online. EUROPE CZECH. Dostupné z: https://esab.com/eur_cs/esab-university/articles/difference-between-welding-brazing-and-soldering/. [cit. 2025-02-19].
- [2] RUŽA, Viliam. Pájení. 2. vyd., upr. a dopl. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] AUTOR, Nenalezený. Fyzikální podstata pájení. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCyda4qSAP2hZNnz_st-3-A4fw. [cit. 2025-02-20].
- [4] HUSÁK, Miroslav. Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03398-8.
- [5] CD-2BQF JBC TOOLS. Online. TME. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/jbc-cd-2bqf/pajeci-stanice/jbc-tools/cd-2bqf/>. [cit. 2025-03-12].
- [6] ESD pájecí stanice Hakko FX888DX-31BY modrožlutá. Online. Pájecí stanice HAKKO. Dostupné z: <https://www.hakko.cz/eshop/product/esd-pajeci-stanice-hakko-fx888dx-31by-modrozluta/>. [cit. 2025-03-12].
- [7] Stanice pájecí s LCD EXTOL INDUSTRIAL 8794520. Online. Extol-cz.cz. Dostupné z: <https://www.extol-cz.cz/naradi-dilenske-naradi-svarecky-pajeci-pristoje/stanice-pajeci-s-lcd-extol-industrial-8794520-283279>. [cit. 2025-03-12].
- [8] JBC TOOLS C245030. Online. TME. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/jbc-c245030/pajeci-hroty/jbc-tools/c245030/>. [cit. 2025-03-12].
- [9] ALZA, a.s. Extol Premium 8894512 Pájka hrotová s hroty pro vypalování do dřeva. Online. Alza. Dostupné z: <https://m.alza.cz/hobby/extol-premium-8894512-pajka-hrotova-s-hroty-pro-vypalovani-do-dreva-d12617446.htm>. [cit. 2025-03-12].
- [10] ELESHOP.EU. Soldering tips: active or passive? Online. Soldering tips: active or passive? Dostupné z: <https://elishop.eu/knowledgebase/active-or-passive/>. [cit. 2025-03-04].

- [11] AIXUN. What is best material for soldering iron tip made of. Online. AiXuntech.com. Dostupné z: <https://www.aixuntech.com/newsinfo/what-is-best-material-for-soldering-iron-tip-made-of/>. [cit. 2025-03-04].
- [12] TME. Soldering tips types and applications. Online. TME. 2023. Dostupné z: <https://www.tme.eu/en/news/library-articles/page/54581/soldering-tips-types-and-applications/>. [cit. 2025-03-04].
- [13] WIKIPEDIE. Pulzně šířková modulace. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Pulzn%C4%9B_%C5%A1%C3%AD%C5%99kov%C3%A1_modulace. [cit. 2025-03-31].
- [14] KUBÍK, Stanislav; KOTEK, Zdeněk a ŠALAMON, Miroslav. Teorie regulace. 1., Lineární regulace. Vyd. 2., opr. Teoretická knižnice inženýra. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1974.
- [15] MRÓZ, Mateusz. Triak – Co je to? Typy, princip činnosti a použití. Online. Botland. 2023. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/triak-co-je-to-typy-princip-cinnosti-a-pouziti/>. [cit. 2025-04-01].
- [16] MACHÁČEK, Jiří. Pokročilé metody řízení procesů. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-937-1.
- [17] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Senzory neelektrických veličin, 1. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [18] FCC PUBLIC a ČASOPIS ELEKTRO. Teplotní závislost odporu kovových vodičů. Online. Odbornecasopisy.cz. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/teplotni-zavislost-odporu-kovovych-vodicu--11677>. [cit. 2025-02-26].
- [19] JAKUBHRNCIR.CZ. Teplotní závislost odporu. Online. ELUC. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/teplotni-zavislost-odporu>. [cit. 2025-02-26].
- [20] DSPE. 5.2.6 Semiconductor temperature sensors. Online. DSPE. Dostupné z: <https://www.dspe.nl/knowledge/thermomechanics/chapter-5-measurement/5-2-contact-sensors/5-2-6-semiconductor-temperature-sensors/>. [cit. 2025-03-06].
- [21] NIGGLE, John. Using the correct thermocouple. Online. Thermal Processing Magazine. Dostupné z: <https://thermalprocessing.com/using-the-correct-thermocouple/>. [cit. 2025-03-09].

- [22] DUFF, Matthew a TOWEY, Joseph. Ways to Measure Temperature Using Thermocouples. Online. Analog Devices. 2010. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/measuring-temp-using-thermocouples.html>. [cit. 2025-03-10].
- [23] MAXIM INTEGRATED. MAX31856 Precision Thermocouple to Digital Converter. Online. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/max31856.pdf>. [cit. 2025-05-03].
- [24] MICROCHIP. MCP960X Thermocouple EMF to Temperature Converter. Online. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP960X-L0X-RL0X-Data-Sheet-20005426F.pdf>. [cit. 2025-05-03].
- [25] JBC TOOLS. JBC Soldering cartridges. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.jbctools.com/cartridges-category-4.html>. [cit. 2025-04-02].
- [26] WIKIPEDIE. ESP32. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/ESP32>. [cit. 2025-03-20].
- [27] ESPRESSIF. ESP32 Series. Online. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. [cit. 2025-05-03].
- [28] MEANWELL. RSP-200, 200W Single Output with PFC Function. Online. Dostupné z: <https://www.czech-meanwell.cz/fotky10575/fotov/RSP-200-spec.pdf>. [cit. 2025-05-03].
- [29] INTERNATIONAL RECTIFIER. IRLZ44N, Power MOSFET. Online. Dostupné z: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/68872/IRF/IRLZ44N.html>. [cit. 2025-05-03].
- [30] INTERNATIONAL RECTIFIER. IR2104, HALF-BRIDGE DRIVER. Online. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IR2104-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7c1c31671. [cit. 2025-05-03].
- [31] LASKAKIT. LaskaKit OLED displej 128x64 1.3" I²C. Online. Laskakit.cz. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/laskakit-oled-displej-128x64-1-3--i2c/>. [cit. 2025-04-02].
- [32] WIKIPEDIA. Rotary encoder. Online. In: Wikipedia, The Free Encyclopedia. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder. [cit. 2025-04-08].
- [33] DRÁTEK.CZ. Rotační enkodér. Online. Dratek.cz. Dostupné z: <https://dratek.cz/arduino/837-rotacni-ekoder.html>. [cit. 2025-04-08].

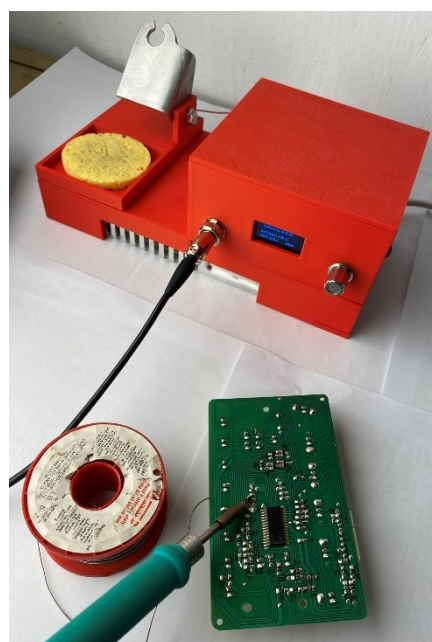
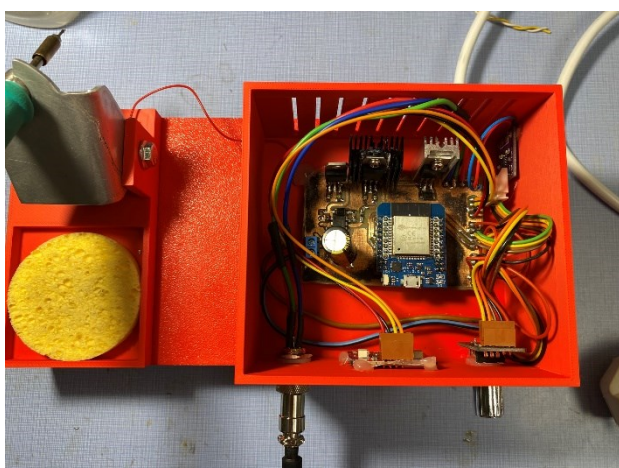
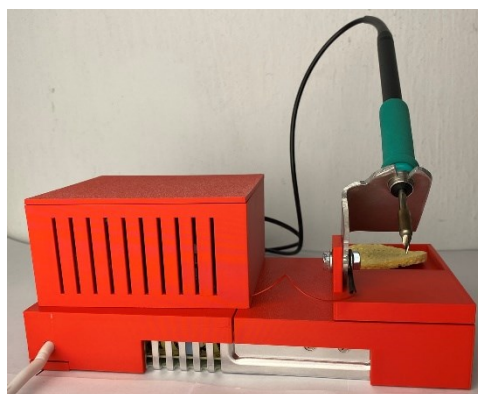
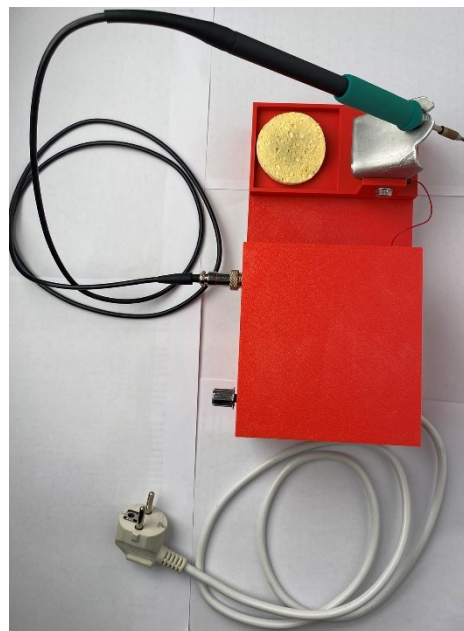
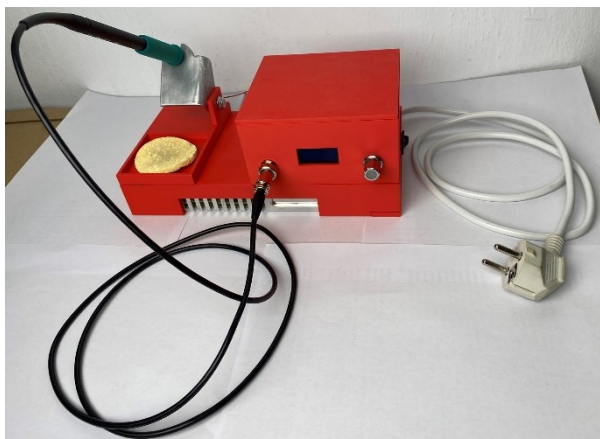
[34] LÁSKAKIT. MAX31856 Schéma. Online. 2023. Dostupné z: https://github.com/LaskaKit/MAX31856_Thermocouple_Amplifier/blob/main/HW/Laskakit-MAX31856.pdf. [cit. 2025-05-06].

[35] LÁSKAKIT. OLED I2C Schéma. Online. 2023.

Dostupné z: https://github.com/LaskaKit/OLED-1_3inch-I2C/blob/main/HW/OLED_1_3INCH_I2C%20Schematic%20v1_2.pdf. [cit. 2025-05-05].

[36] REICHL, Jaroslav. Encyklopedie fyziky. Online. Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/643-kapilarita>. [cit. 2025-02-20].

Příloha A – Fotodokumentace pájecí stanice



Příloha B – Zdrojový kód

Přílohou B je kompletní zdrojový kód pro ESP32.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <U8g2lib.h>
#include <Adafruit_MAX31856.h>
#include <PID_v1.h>
#include <EEPROM.h>

// Displej inicializace
U8G2_SH1106_128X64_NONAME_F_HW_I2C display(U8G2_R0, /* reset=*/
U8X8_PIN_NONE);

// MAX31856 definice
#define MAX_CS 5
#define MAX_MOSI 23
#define MAX_MISO 19
#define MAX_SCK 18

//výstupní pin a snímání odložení hrotu definice
#define MOSFET_PIN 26
#define SLEEP_SENSOR_PIN 33

// PWM nastavení
const int PWM_FREQ = 1000;
const int PWM_CHANNEL = 0;
const int PWM_RESOLUTION = 8;

// PID proměnné
int setTemperature = 0;
int targetTemperature;
int currentTemperature;
int outputPWM;

// Pomocné float proměnné pro PID knihovnu
double PID_Input, PID_Output, PID_Setpoint;

double Kp = 10.0, Ki = 0.8, Kd = 1.5;
PID myPID(&PID_Input, &PID_Output, &PID_Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);

// SPI a MAX
SPIClass SPI_MAX = SPIClass(VSPI);
Adafruit_MAX31856 max31856 = Adafruit_MAX31856(MAX_CS);

// Enkodér piny
#define ENCODER_CLK 34
#define ENCODER_DT 35
#define ENCODER_SW 25

// Textový stav (pro OLED): RUN / STBY / NO TIP
char SleepSens[20] = "STBY";

int lastCLKState;
volatile bool encoderMoved = false;
volatile int encoderDirection = 0;
```

```

unsigned long startMillis = 0;      // Proměnná pro měření času od
spuštění

// Přerušeni pro čtení směru otáčení enkodéru
void IRAM_ATTR readEncoder()
{
    int clkState = digitalRead(ENCODER_CLK);
    int dtState = digitalRead(ENCODER_DT);
    encoderDirection = (dtState != clkState) ? 1 : -1;
    encoderMoved = true;
}

// ULOŽENÍ DO EEPROM
void saveSetTemperatureToEEPROM()
{
    EEPROM.put(0, setTemperature);
    EEPROM.commit();
}

// NAČTENÍ Z EEPROM
void loadSetTemperatureFromEEPROM() {
    int temp = 0;
    EEPROM.get(0, temp);
    if (temp > 30 && temp < 400) {
        setTemperature = temp;
    } else {
        setTemperature = 220;
    }
}

void setup() {
    delay(1000);                      //delay před inicializací (srovnání
    napájení)
    Wire.begin(21, 22);
    Serial.begin(115200);

    EEPROM.begin(512);                //inicializace a načtení hodnot z
    EEPROM
    loadSetTemperatureFromEEPROM();

    SPI_MAX.begin(MAX_SCK,           MAX_MISO,           MAX_MOSI,           MAX_CS);
    //inicializace MAX31856
    if (!max31856.begin()) {
        Serial.println("MAX31856 nenalezen!");           //chybové
        hlášení při chybném čtení MAX31856 inicializace
        while (1);
    }
    max31856.setThermocoupleType(MAX31856_TCTYPE_K);    //nastavení
    typu termočláčku na typ K

    display.begin();                  //inicializace
    displeje
    display.clearBuffer();
    display.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    display.drawStr(15, 15, "Soldering station");
    display.sendBuffer();

    ledcSetup(PWM_CHANNEL, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION);    //inicializace
    PWM

```

```

    ledcAttachPin(MOSFET_PIN, PWM_CHANNEL); //nastavení
MOSFET_PIN jako PWM kanál

    myPID.SetMode(AUTOMATIC); //nastavení
režimu PID na automatická
    myPID.SetOutputLimits(0, 255); // Výstup PWM
v rozsahu 8bit

    pinMode(ENCODER_CLK, INPUT_PULLUP); //nastavení
pinů Encoderu jako vstupní s Pull-up rezistorem
    pinMode(ENCODER_DT, INPUT_PULLUP);
    pinMode(ENCODER_SW, INPUT_PULLUP);
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(ENCODER_CLK), readEncoder,
CHANGE); //přiřazení přerušování
    lastCLKState = digitalRead(ENCODER_CLK);

    pinMode(SLEEP_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP); //nastavení
pinu stojánku jako vstupní s Pull-up rezistorem

    startMillis = millis(); //čas spuštění
}

// Funkce výpisu na displej a serial monitor v případě ladění
void display_write() {
    display.clearBuffer();
    display.setFont(u8g2_font_helvb08_tr);
    display.drawStr(15, 15, "Soldering station");

    char actTempStr[20];
    char setTempStr[20];
    sprintf(actTempStr, "ACTUAL: %d °C", currentTemperature);
    sprintf(setTempStr, "SET: %d °C", setTemperature);

    display.drawStr(10, 35, actTempStr);
    display.drawStr(10, 50, setTempStr);
    display.drawStr(85, 50, SleepSens);
    display.sendBuffer();

    Serial.print(millis() - startMillis);
    Serial.print(",");
    Serial.print(currentTemperature);
    Serial.print(",");
    Serial.println(outputPWM);
}

void loop() {
    static unsigned long lastChangeTime = 0;
    static int lastSavedTemperature = 0;

    //zpracování změny nastavené teploty pomocí enkodéru
    if (encoderMoved) {
        encoderMoved = false;
        setTemperature += encoderDirection * 5;
        if (setTemperature < 30) setTemperature = 30;
        if (setTemperature > 400) setTemperature = 400;
        lastChangeTime = millis();
    }

    //uložení nové hodnoty teploty do EEPROM po 5 s nečinnosti

```

```

    if (millis() - lastChangeTime > 5000 && setTemperature !=
lastSavedTemperature) {
        saveSetTemperatureToEEPROM();
        lastSavedTemperature = setTemperature;
    }

    //standby režim pokud je hrot ve stojánku
    bool sleepDetected = digitalRead(SLEEP_SENSOR_PIN) == LOW;
    if (sleepDetected) {
        strcpy(SleepSens, "STBY");
        targetTemperature = 150;
    } else {
        strcpy(SleepSens, "RUN");
        targetTemperature = setTemperature;
    }

    //vypnutí výstupu pro čisté měření teploty
    ledcWrite(PWM_CHANNEL, 0);
    delay(50);
    currentTemperature = (int)max31856.readThermocoupleTemperature();

    //detekce odpojeného hrotu nebo chyby měření
    if (currentTemperature <= -199) {
        strcpy(SleepSens, "NO TIP");
        targetTemperature = 0;
        currentTemperature = 0;
        ledcWrite(PWM_CHANNEL, 0);
        display_write();
        delay(50);
        return;
    }
    //PID regulace
    PID_Input = (float)currentTemperature;
    PID_Setpoint = (float)targetTemperature;
    myPID.Compute();
    outputPWM = (int)PID_Output;

    //zapsání výstupu PWM a aktualizace displeje
    ledcWrite(PWM_CHANNEL, outputPWM);
    display_write();
    delay(50);
}

```