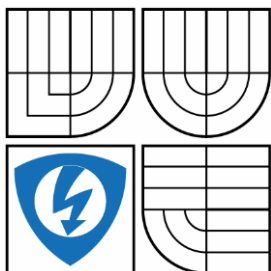


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY  
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

# MIKROPROCESOREM ŘÍZENÁ MIKROPÁJKA

MICROSOLDER CONTROLLED BY MICROPROCESSOR

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

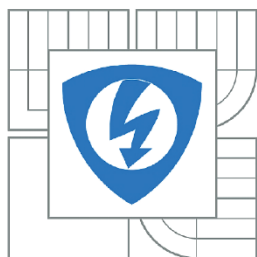
JIŘÍ STAVĚLÍK

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMAŠ MACHO, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Automatizační a měřicí technika**

**Student:** Jiří Stavělík

**Ročník:** 3

**ID:** 154874

**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## Mikroprocesorem řízená mikropájka

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou řízení mikropájky.
2. Navrhněte koncepci mikroprocesorového systému, umožňující udržování konstantní teploty hrotu mikropájky. Teplota bude zadávána pomocí enkodéru a zobrazována na displeji.
3. Navrhněte obvodové řešení systému, nakreslete schéma zapojení, stanovte hodnoty jednotlivých součástek.
4. Mikroprocesorový systém realizujte a vytvořte výrobní dokumentaci.
5. Navrhněte a implementujte a odlaďte potřebné softwarové vybavení.
6. Zařízení odzkoušejte a diskutujte dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FROHN, Manfred - OBERTHÜR, Wolfgang - SIEDLER, H., WIEMER, M., ZASTROW, P. Elektronika - polovodičové součástky a základní zapojení. Praha: BEN, 2006. 500 s. ISBN 80-7300-123-3.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 25.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Macho, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.**

*Předseda oborové rady*

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a realizací napájecího a řídicího systému mikropájky, který umožňuje udržovat konstantní teplotu pájecího hrotu. Řídicí systém je založen na mikrokontroléru Atmega328 firmy Atmel, součástí práce je implementace a odladění řídicího programu. Navržené řešení umožňuje zadávat teplotu hrotu pomocí rotačního enkodéru a skutečnou teplotu zobrazovat na LCD displeji. Zařízení také detekuje odpojení hrotu, akusticky signalizuje dosažení požadované teploty a pamatuje si poslední nastavenou teplotu.

## **Klíčová slova**

Mikropájka, LCD, rotační enkodér, pájecí pero, JBC T245A, Solomon SL20/30L, termočlánek, mikrokontrolér, Atmega328, AVR.

## **Abstract**

This thesis describes circuit design and realization of the power and control system, which can hold constant temperature of solder tip. Control system is based on microcontroller Atmega328 of company Atmel, part of the work is the implementation and debugging control software. This solution allows to enter temperature by rotary encoder and to show the real temperature on LCD display. This hardware also detects disconnection of solder tip, acoustic signals when the required temperature is reached and it holds last set temperature.

## **Keywords**

Microsolder, LCD, rotary encoder, soldering handle, JBC T245A, Solomon SL20/30L, thermocouple, microcontroller, Atmega328, AVR.

STAVĚLÍK, J. *Mikroprocesorem řízená mikropájka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 56 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Tomáš Macho, Ph.D..

## Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Mikroprocesorem řízená mikropájka“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 22. května 2015

.....  
(podpis autora)

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Machovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 22. května 2015

.....  
(podpis autora)

# Obsah

|          |                                                                    |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod.....</b>                                                   | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Řízení mikropájky.....</b>                                      | <b>4</b>  |
| 2.1      | Používané způsoby řízení.....                                      | 5         |
| <b>3</b> | <b>Koncepce mikropájky .....</b>                                   | <b>6</b>  |
| 3.1      | Požadavky na navrhovanou mikropájku .....                          | 6         |
| 3.2      | Blokové schéma .....                                               | 6         |
| <b>4</b> | <b>Použitá pájecí pera .....</b>                                   | <b>8</b>  |
| 4.1      | JBC T245A .....                                                    | 8         |
| 4.2      | Solomon SL20/30L .....                                             | 8         |
| 4.3      | Teplotní závislost snímače teploty hrotu.....                      | 9         |
| <b>5</b> | <b>Výběr hlavních komponent .....</b>                              | <b>11</b> |
| 5.1      | Mikrokontrolér .....                                               | 11        |
| 5.1.1    | Základní charakteristika mikrokontroléru Atmega328 .....           | 11        |
| 5.2      | Zesilovač signálu z termočlásku .....                              | 12        |
| 5.3      | Napěťová reference .....                                           | 13        |
| 5.4      | Zobrazovací LCD displej .....                                      | 14        |
| 5.5      | Snížující měnič.....                                               | 15        |
| 5.5.1    | Návrh tlumivky .....                                               | 16        |
| 5.5.2    | Návrh filtračního kapacitoru .....                                 | 18        |
| 5.5.3    | Výběr polovodičů měniče .....                                      | 19        |
| 5.5.4    | Realizace tlumivky .....                                           | 20        |
| 5.5.5    | Budič tranzistoru .....                                            | 20        |
| 5.5.6    | Návrh tloušťky spojů výkonové části měniče .....                   | 23        |
| 5.6      | Rotační enkodér .....                                              | 24        |
| 5.7      | Zvuková signalizace.....                                           | 25        |
| 5.8      | Komunikace s počítačem .....                                       | 26        |
| 5.9      | Napájecí obvody .....                                              | 27        |
| 5.9.1    | Návrh zdroje s transformátorem.....                                | 28        |
| 5.9.2    | Zdroj s průmyslovým měničem napětí.....                            | 29        |
| 5.9.3    | Stabilizace napájecího napětí pro číslicové obvody .....           | 29        |
| 5.9.4    | Stabilizace napájecího napětí pro analogové obvody.....            | 30        |
| <b>6</b> | <b>Realizace.....</b>                                              | <b>31</b> |
| 6.1      | Mechanické uspořádání.....                                         | 31        |
| 6.2      | Osazení desky plošných spojů a oživení elektronických obvodů ..... | 31        |

|           |                                                                |           |
|-----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.3       | Nahrání řídicího softwaru .....                                | 32        |
| <b>7</b>  | <b>Programové vybavení mikrokontroléru.....</b>                | <b>34</b> |
| 7.1       | Knihovna pro práci s LCD displejem.....                        | 34        |
| 7.2       | Knihovna sériové komunikace (USART) .....                      | 34        |
| 7.3       | Obsluha rotačního enkodéru s axiálním tlačítkem .....          | 35        |
| 7.4       | Čítače / Časovače .....                                        | 35        |
| 7.4.1     | Čítač / Časovač 0.....                                         | 35        |
| 7.4.2     | Čítač / Časovač 1.....                                         | 35        |
| 7.4.3     | Čítač / Časovač 2.....                                         | 35        |
| 7.5       | Hlavní smyčka.....                                             | 36        |
| <b>8</b>  | <b>Identifikace soustavy pájecího pera (Solomon) .....</b>     | <b>37</b> |
| <b>9</b>  | <b>Dosažené výsledky .....</b>                                 | <b>39</b> |
| <b>10</b> | <b>Problémy a možná vylepšení .....</b>                        | <b>41</b> |
| <b>11</b> | <b>Závěr.....</b>                                              | <b>42</b> |
|           | <b>Seznam zkratk, symbolů a veličin.....</b>                   | <b>43</b> |
|           | <b>Literatura.....</b>                                         | <b>44</b> |
|           | <b>Příloha.....</b>                                            | <b>47</b> |
| A         | Rozpis součástek .....                                         | 47        |
| B         | Naměřené hodnoty závislosti napětí termočlánu na teplotě ..... | 49        |
| C         | Výsledná schémata zapojení .....                               | 51        |
| D         | Plošný spoj .....                                              | 53        |
| D.1       | Motiv plošného spoje řídicí desky .....                        | 53        |
| D.2       | Osazovací plán řídicí desky .....                              | 54        |
| D.3       | Motiv plošného spoje převodníku úrovní.....                    | 55        |
| D.4       | Osazovací plán převodníku úrovní.....                          | 55        |
| E         | Obsah příloženého CD .....                                     | 56        |

# Seznam obrázků

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 2.1: Pájecí pero ERS50 .....                                                                   | 4  |
| Obrázek 2.2: Řez hrotem (používaným např. u ERS50).....                                                | 5  |
| Obrázek 3.1: Blokové schéma zapojení .....                                                             | 6  |
| Obrázek 4.1: Zapojení vývodů pájecího pera JBC - T245A (obrázek převzat a upraven z [24]).             | 8  |
| Obrázek 4.2: Zapojení vývodů pájecího pera Solomon (obrázek převzat a upraven z [39]) .....            | 9  |
| Obrázek 4.3: Závislost napětí termočlánu pájecího pera na teplotě hrotu .....                          | 9  |
| Obrázek 5.1: Schéma zapojení zesilovače termočlánekového napětí.....                                   | 13 |
| Obrázek 5.2: Schéma zapojení napěťové reference .....                                                  | 14 |
| Obrázek 5.3: Zapojení LCD.....                                                                         | 15 |
| Obrázek 5.7: Siločára ve feromagnetiku .....                                                           | 18 |
| Obrázek 5.8: Schéma zapojení step-down měniče.....                                                     | 20 |
| Obrázek 5.9: Pohled na vyhotovenou tlumivku .....                                                      | 20 |
| Obrázek 5.5: Spínač v zapojení emitorový sledovač / komplementární zapojení (převzato z [40])<br>..... | 21 |
| Obrázek 5.6: Schéma zapojení budiče výkonového tranzistoru .....                                       | 22 |
| Obrázek 5.10: Dovolené proudové zatížení vodiče (převzato a upraveno z [33]) .....                     | 23 |
| Obrázek 5.11: Výstupní signál z digitálního enkodéru (převzato a upraveno z [43]).....                 | 24 |
| Obrázek 5.12: Schéma zapojení filtru pro rotační enkodér.....                                          | 25 |
| Obrázek 5.13: Schéma zapojení zvukové signalizace.....                                                 | 26 |
| Obrázek 5.14: Zapojení komunikace s PC.....                                                            | 27 |
| Obrázek 5.15: Výsledné schéma zapojení zdroje 24 V s transformátorem.....                              | 29 |
| Obrázek 5.16: Výsledné schéma zapojení zdroje pro číslicové obvody .....                               | 30 |
| Obrázek 5.17: Výsledné schéma zapojení pro analogové obvody .....                                      | 30 |
| Obrázek 8.1: Odezva na snížený jednotkový skok pájecího pera Solomon (odečtena teplota<br>okolí) ..... | 37 |
| Obrázek 8.2: Příklad určení vzorkovací frekvence pro 280 °C (odečtena teplota okolí).....              | 38 |
| Obrázek 9.1: Zaletovaná DPS pomocí realizované mikropáčky .....                                        | 40 |
| Obrázek 1.1: Výsledné schéma zapojení řídicí desky.....                                                | 51 |
| Obrázek 1.2: Výsledné schéma zapojení převodníku úrovní.....                                           | 52 |
| Obrázek 1.3: Výsledný motiv řídicí desky - vrchní strana.....                                          | 53 |
| Obrázek 1.4: Výsledný motiv řídicí desky - spodní strana .....                                         | 53 |
| Obrázek 1.5: Osazovací plán řídicí desky - vrchní strana.....                                          | 54 |
| Obrázek 1.6: Osazovací plán řídicí desky - spodní strana .....                                         | 54 |
| Obrázek 1.7: Výsledný motiv převodníku úrovní – spodní strana.....                                     | 55 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1.8: Osazovací plán převodníku úrovní - vrchní strana ..... | 55 |
| Obrázek 1.9: Osazovací plán převodníku úrovní - spodní strana.....  | 55 |

# Seznam tabulek

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabulka 4.1: Rozdělení termočlánu dle použitých kovů (převzato z [35]) .....                  | 10 |
| Tabulka 5.1: Zapojení vývodů LCD WH0802A1 .....                                               | 15 |
| Tabulka 5.2: Parametry zvoleného feritového jádra .....                                       | 17 |
| Tabulka 9.1: Parametry navržené mikropájky .....                                              | 39 |
| Tabulka 11.1: Rozpis součástek - Řídicí deska.....                                            | 47 |
| Tabulka 1.2: Rozpis součástek - Řídicí deska (ostatní materiál) .....                         | 48 |
| Tabulka 1.3: Rozpis součástek - Převodník úrovní.....                                         | 48 |
| Tabulka 1.4: Rozpis součástek - Převodník úrovní (ostatní materiál) .....                     | 48 |
| Tabulka 1.5: Závislost napětí termočlánu pájecího pera JBC T245A na teplotě hrotu.....        | 49 |
| Tabulka 1.6: Závislost napětí termočlánu pájecího pera Solomon SL 20/301 na teplotě hrotu. 50 |    |

# 1 ÚVOD

Vlivem zmenšování elektroniky a jednoduché strojní manipulaci se součástkami pro povrchovou montáž SMD se čím dál více rozšiřuje technologie pro povrchovou montáž součástek SMT a vytlačuje součástky s drátovými vývody THT. SMD součástky jsou mnohdy citlivé na ESD a také na přehřátí. Navíc s nástupem bezolovnatých pájek je dnes základem každé, ať už amatérské nebo profesionální, laboratoře zabývající se vývojem elektroniky kvalitní mikropájka.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat mikropájku řízenou mikroprocesorem, umožňující zadávání teploty pomocí rotačního enkodéru a zobrazení aktuální teploty na displeji. Dalším krokem je doplnění navrhované mikropájky o vhodné uživatelské funkce, které plynou z praktického použití. Cílem je vytvořit zařízení, které překoná parametry mezi amatéry rozšířené mikropájky ERS50 [4].

## 2 ŘÍZENÍ MIKROPÁJKY

Na trhu se dnes vyskytuje velké množství pájecích stanic v různých cenových kategoriích. Na první pohled nemusí být zřejmý důvod rozdílu cen a mnohdy není úplně jasný ani z katalogového listu (popisu) výrobce. Při podrobnějším prozkoumání lze zjistit, že levnější varianty pájecích stanic nejsou schopny udržet nastavenou teplotu hrotu.

Při dotyku pájecího pera s pájenou plochou klesne na hrotu teplota, tento jev zaznamená řídicí elektronika a sepne vyhřívací okruh, což vede ke snaze dorovnat původně nastavenou teplotu. Pokud ale uživatel potřebuje zapájet více vývodů najednou, může nastat problém. Jedním z často vyskytujících se nedostatků bývá pomalá rychlost odezvy pera způsobená velkou vzdáleností snímače teploty od pájecího hrotu (cca 2 cm - viz Obrázek 2.1). Navíc při nasazení hrotu vznikne na spoji pero/hrot vzduchová mezera (Obrázek 2.2). To má za následek, že neměříme skutečnou teplotu hrotu a změny teploty hrotu se na snímač přenáší se zpožděním.



1 ... umístění snímače teploty

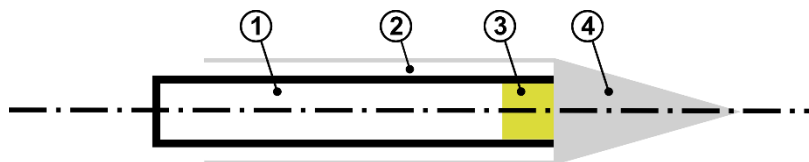
Obrázek 2.1: Pájecí pero ERS50

To většinou vede k situaci, kdy se mezi krátkými přestávkami mezi pájením nestihne hrot vytopit na žádanou hodnotu teploty, a ta pak neustále klesá. Uvedený jev uživatel rozpozná zhoršenou možností pájení a intuitivně zvýší žádanou teplotu. To způsobuje velké opotřebení hrotu a také velice nekvalitním (přepáleným) spojům.

Proto jsou důležitými faktory při výběru pájecího pera, potažmo hrotu: velká tepelná kapacita, dostatečný topný výkon a mechanické zpracování hrotu [34].

Tepelnou kapacitu lze zvýšit zvýšením hmotnosti hrotu, který je pak schopen více akumulovat teplo. Zvýšením výkonu pájecího pera lze dodat více tepelné energie do hrotu a tím zlepšit kvalitu pájených spojů. Konstrukci hrotu lze také výrazně zkvalitnit výsledné spoje.

Pokud je součástí hrotu teplotní snímač i topné těleso, zbavíme se nepříznivých jevů na přechodu kov/vzduchová mezera/kov (viz Obrázek 2.2). Bohužel u velké většiny pájecích per v cenové hladině 1000 CZK není teplotní snímač součástí hrotu.



- |   |     |                    |
|---|-----|--------------------|
| 1 | ... | tělo pájecího pera |
| 2 | ... | vzduchová mezera   |
| 3 | ... | snímač teploty     |
| 4 | ... | hrot pájecího pera |

Obrázek 2.2: Řez hrotem (používaným např. u ERS50)

## 2.1 Používané způsoby řízení

Jestliže chceme udržet konstantní teplotu hrotu, musíme použít zpětnovazební řízení, a to buď analogové, nebo digitální.

Analogové řízení se většinou používá u levnějších typů stanic, kde se žádaná a skutečná hodnota teploty porovnává komparátorem realizovaným pomocí operačního zesilovače. Dražší typy analogových stanic bývají vybaveny jednoduchým regulátorem složeným z analogových součástek. Ovšem při složitějších strukturách regulátorů a dalších požadavcích na stanici (snížení teploty při delší prodlevě, vypnutí hrotu, signalizace odpojení hrotu, zobrazení žádané a skutečné teploty atd.) začínají být pájecí stanice z hlediska počtu použitých součástek, a tím pádem i z finančního hlediska, nevýhodné a je vhodnější použít digitální řízení.

Digitální řídicí systém je založen na řídicím mikrokontroléru. Požadované funkce jsou řešeny převážně na softwarové úrovni s minimem okolních součástek.

V této práci jsem použil digitální řízení mikropájkou.

### 3 KONCEPCE MIKROPÁJKY

Navrhovaná mikropájka bude sloužit pro pájení cínem, což je z technologického hlediska měkká pájka. Proto je nutné zajistit regulaci teploty hrotu do 400 °C, od této teploty výše jsou pájky označovány jako tvrdé [38].

Před samotným návrhem je třeba stanovit požadavky na pájecí stanici a definovat požadované funkce. Na základě těchto požadavků vytvoříme blokové schéma systému.

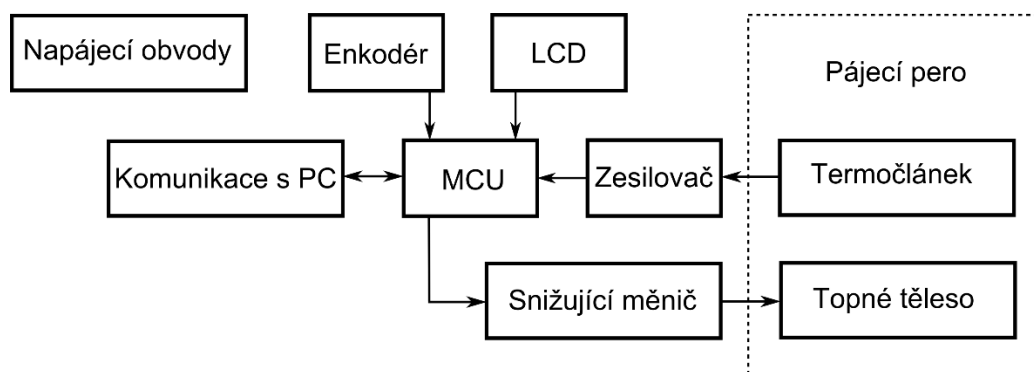
#### 3.1 Požadavky na navrhovanou mikropájku

Požadavky na navrhovanou mikropájku lze shrnout do následujících bodů:

- regulace teploty v rozmezí (200 – 400) °C,
- možnost zadávat požadovanou teplotu pomocí rotačního enkodéru,
- zobrazení teploty hrotu společně s požadovanou hodnotou teploty,
- komunikace s PC převážně pro ladění programu (debug),
- udržení konstantní teploty hrotu s co nejnižší odchylkou,
- řízení postavené na mikrokontroléru,
- frekvence spínání výkonového prvku nad pásmem slyšitelných frekvencí,
- minimum hardwarových nastavovacích prvků (trimrů),
- univerzálnost konstrukce, která pojme širokou škálu pájecích per (dvouvodičová i čtyřvodičová).

#### 3.2 Blokové schéma

Ze stanovených požadavků můžeme sestavit výsledné blokové schéma zapojení mikropájky (viz Obrázek 3.1).



Obrázek 3.1: Blokové schéma zapojení

Teplota pájecího pera je snímána termočlánkem. Napětí na výstupu termočlánku je v řádu desetin milivoltů a je třeba ho zesílit na úroveň jednotek voltů. Zesílený signál je veden do AD převodníku, který je součástí MCU. Topné těleso by sice bylo možno napájet přímo pulsně šířkovým napětím, ale vzhledem k dlouhým přívodním kabelům by zařízení mohlo rušit okolí elektromagnetickým smogem. Vhodnějším řešením je napájet

topné těleso stejnosměrným napětím získaným pomocí snižujícího měniče. Výstupní napětí měniče bude řízeno pulzně šířkovým napětím generovaným mikrokontrolérem MCU. Snižující měnič je použit vzhledem k vysoké účinnosti ve srovnání s lineárním stabilizátorem. Snižující měnič je řízen pomocí pulzně šířkového napětí, které generuje MCU. Aktuální a zadanou teplotu zobrazuje mikrokontrolér na LCD displeji. Zadávání žádané teploty pak zajišťuje rotační enkodér. Pro vývoj softwaru je k mikrokontroléru připojen interface pro komunikaci s PC.

## 4 POUŽITÁ PÁJECÍ PERA

### 4.1 JBC T245A

Pokud nebereme v úvahu čínské kopie zavedených výrobců pak jednou z nejlevnějších variant, která splňuje výše definované požadavky, je pájecí pero od firmy JBC, konkrétně typ JBC T245A [25]. Součástí pájecího pera, respektive hrotu, je topné těleso i snímač teploty, což je výhodné z hlediska rychlosti odezvy a přesné informace o teplotě hrotu. Dále výrobce zaručuje velkou tepelnou kapacitu hrotu oproti konkurenčním výrobkům, což dokazují naměřené charakteristiky uvedené na webu výrobce [24].

Další výhodou tohoto pera je odezva na skokovou změnu teploty, kdy vytopení hrotu z pokojové teploty na 300 °C trvá 2,5 sekundy. Bohužel výrobce neudává přesné vnitřní zapojení pera.

Jediné, co lze z údajů na webových stránkách výrobce o hrotech zjistit, je použití termočlánku jako snímače teploty. O zapojení vývodů hrotu se na zahraničních fórech vedou diskuze [26], proto byly jednotlivé varianty otestovány měřením.

Z měření vyplynul zajímavý závěr, a to že lze naměřit stejné termočlánekové napětí mezi vývody 1 - 2 a 5 - 2 v polaritě, kterou zachycuje Obrázek 4.1, což znamená, že jde o tzv. „dvouvodičové“ zapojení, kdy jsou společné vodiče pro vyhřívání a snímač teploty.



- |   |     |                             |
|---|-----|-----------------------------|
| 1 | ... | termočlánek -, topné těleso |
| 2 | ... | termočlánek +               |
| 5 | ... | termočlánek -, topné těleso |

Obrázek 4.1: Zapojení vývodů pájecího pera JBC - T245A (obrázek převzat a upraven z [24])

Označení vývodů odpovídá číslům vyraženým na konektoru pájecího pera.

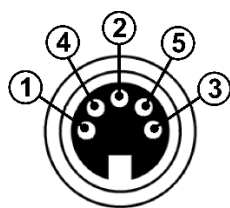
### 4.2 Solomon SL20/30L

Jako další pájecí pero bylo zvoleno Solomon SL20/30L. Jde o „čtyřvodičový“ typ pera, kde jsou rozděleny vodiče na vytápěcí (topné těleso) a snímací (snímač teploty). Problémem tohoto pera je oddělení snímače teploty vzduchovou mezerou od pájecího hrotu. Naopak výhodou je příznivá cena 299 CZK s DPH<sup>1</sup>.

Ani k tomuto peru není možné nalézt dostačující informace na webu výrobce. Proto je zapojení vývodů převzato z [36] a je zobrazeno na Obrázek 4.2.

---

<sup>1</sup> uvedené ceny jsou aktuální k 21. 3. 2015 u firmy EZK [14].



- |   |     |               |
|---|-----|---------------|
| 1 | ... | termočlánek + |
| 2 | ... | -             |
| 3 | ... | topení        |
| 4 | ... | termočlánek - |
| 5 | ... | topení        |

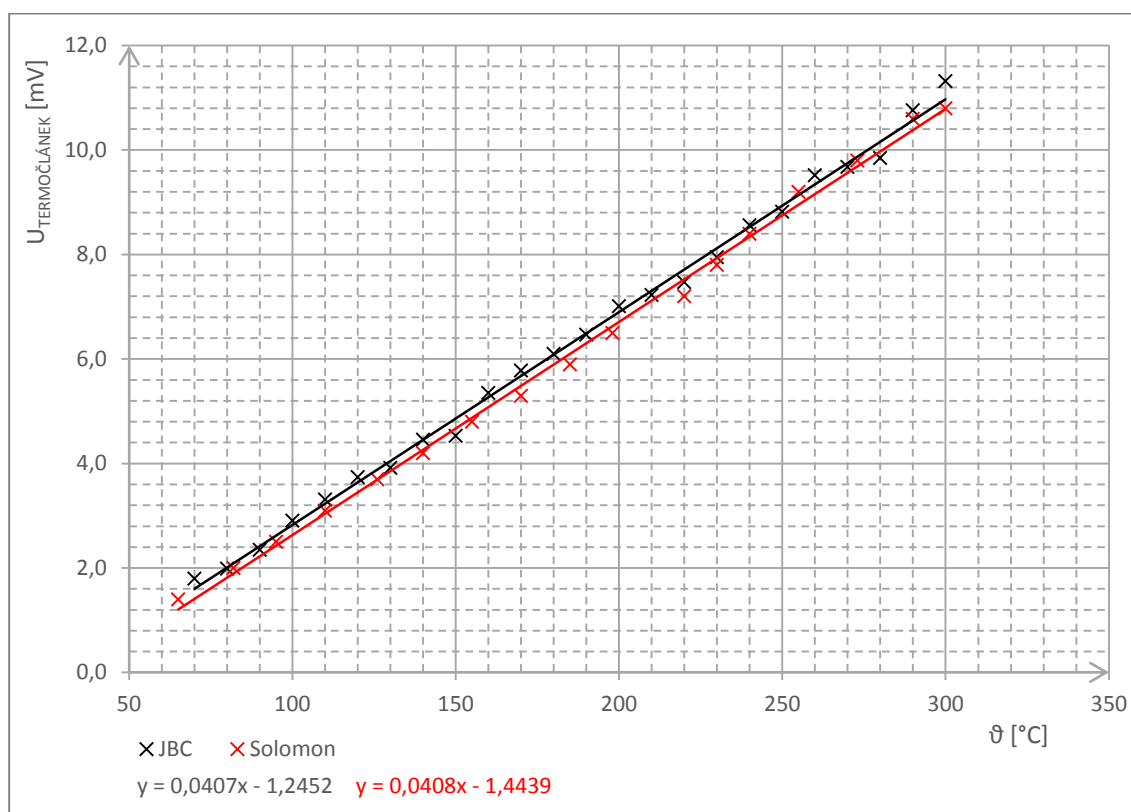
Obrázek 4.2: Zapojení vývodů pájecího pera Solomon (obrázek převzat a upraven z [39])

### 4.3 Teplotní závislost snímače teploty hrotu

Vzhledem k nedostatečným informacím výrobce bylo třeba teplotní závislost snímače teploty hrotu získat pomocí vlastního měření.

Do topného vinutí byl přiváděn konstantní proud 0,5 A. Výstupní napětí termočlánu bylo snímáno multimetrem Metex M-3270D. Teplota hrotu byla měřena multimetrem Mastech MY-64 s připojeným snímačem teploty.

Výsledné charakteristiky zachycuje Obrázek 4.3 a změřené hodnoty tabulka v příloze B.



Obrázek 4.3: Závislost napětí termočlánu pájecího pera na teplotě hrotu

Z rovnice přímky změřené charakteristiky lze určit, že změřená citlivost termočlánu je 40,7  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  pro pájecí pero firmy JBC a 40,8  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  pro pájecí pero Solomon. Srovnáním s tabulkou běžně používaných termočlánu (viz Tabulka 4.1) zjistíme, že pájecí pera používají termočlánek typu K.

Použitá metoda měření není příliš přesná, ale pro účely identifikace termočlánu je dostačující.

Tabulka 4.1: Rozdělení termočlánku dle použitých kovů (převzato z [35])

| Typ | Měřený rozsah [°C] | Citlivost [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ] |
|-----|--------------------|--------------------------------------------|
| B   | 0 - 1700           |                                            |
| C   | 0 - 2300           |                                            |
| D   | 0 - 2300           |                                            |
| E   | 200 - 950          |                                            |
| G   | 0 - 2300           |                                            |
| J   | 0 - 750            | 52,3                                       |
| K   | -200 - 1250        | 40,8                                       |
| N   | -270 - 1300        |                                            |
| R   | 0 - 1450           |                                            |
| S   | 0 - 1400           | 6,3                                        |
| E   | -250 - 350         |                                            |
| T   |                    | 43,0                                       |

## 5 VÝBĚR HLAVNÍCH KOMPONENT

### 5.1 Mikrokontrolér

V dnešní době existuje spousta firem zabývajících se výrobou mikrokontrolérů pro nejrůznější použití, např. Atmel, Microchip, Freescale, NXP, Texas Instrument atd. Každý z výrobců rozděluje své procesory do různých sérií a rodin (ARM, AVR atd.). Jednotlivé procesory se liší především podle množství periférií, výkonu, velikosti paměti (RAM, flash), spotřeby elektrické energie, způsobem nahrávání programu do programové paměti typu flash a v neposlední řadě také vývojovým prostředím.

Pro naše účely bezpečně postačí jakýkoli 8bitový procesor s dostatečným množstvím binárních vstupů/výstupů, pulzní šířkovou modulací (dále PWM), analogově digitálním převodníkem (dále A/D převodník) a rozhraním pro sériovou komunikaci (dále USART) či USB rozhraním. Dalším kritériem při výběru řídicího mikrokontroléru bude uživatelská přívětivost, cena a použitelnost vývojového prostředí.

Zmíněné požadavky splňují procesory firem Atmel [2] a Microchip [3].

Pro finální realizaci byl zvolen mikrokontrolér Atmega328 [1], který byl vybrán na základě velice pozitivních zkušeností s touto řadou. K rozhodujícím kritériím výběru tohoto mikrokontroléru patří větší paměť flash (32 kB), počet periférií a dostačující množství binárních vstupů/výstupů. Z důvodů zachování co nejmenších rozměrů plošného spoje a lepšího tažení propojovacích cest byla vybrána SMD verze tohoto obvodu v pouzdru TQFP32.

#### 5.1.1 Základní charakteristika mikrokontroléru

##### Atmega328

Jedná se o 8bitový mikrokontrolér s redukovanou instrukční sadou (RISC), který dokáže zpracovat 1 milion instrukcí za sekundu (MIPS) na 1 MHz taktovacího kmitočtu.

Dále je vybaven 32 kB programové ISP (In-System Programming) flash paměti, což znamená, že je možné procesor programovat přímo uvnitř obvodu bez nutnosti jej vyjmout. Obsahuje 2 kB operační paměti (SRAM) a 1 kB EEPROM, která slouží pro uložení dat, jež musí zůstat zachovány i po odpojení napájení. Napájecí napětí obvodu se pohybuje od 1,8 V do 5,5 V. Vyrábí se v pouzdrech DIP28, TQFP32, MLF28 a MLF32.

Pro méně náročné aplikace na přesnost časování může být taktovací kmitočet zajištěn vnitřním oscilátorem (1 – 8) MHz, nebo pro náročnější aplikace lze použít vnější krystal či RC oscilátor.

Procesor je vybaven množstvím periférií, mezi nejdůležitější patří tyto:

- 2x 8bitový a 1x 16bitový čítač/časovač,
- 6x PWM (pulzně šířková modulace),
- 6x A/D převodník + 2x A/D převodník v SMD provedení (analogově/digitální převodník),

- USART (synchronní / asynchronní sériové rozhraní),
- Watch dog – restartuje procesor při zaseknutí,
- SPI,
- I<sup>2</sup>C.

Bližší informace lze nalézt v katalogovém listu výrobce [1].

## 5.2 Zesilovač signálu z termočládku

Jako snímač teploty je v regulačním obvodu použit termočlánek typu K, který generuje na svém výstupu velice nízké napětí 40,8  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . To je nutné patřičně zesílit a impedančně přizpůsobit pro navazující A/D převodník. Další nevýhodou termočládku je nutnost kompenzace okolní teploty, kterou je potřebné připočítat k měřené teplotě termočládkem. To plyne přímo z principu jeho funkce. Termočlánek je založen na Seebeckově jevu, to znamená, že na spoji dvou různých kovů o různé teplotě vzniká elektrické napětí úměrné teplotě. Závislost napětí termočládku na teplotě není obecně lineární funkcí. Z grafu (Obrázek 4.3) je však zřejmé, že v použitém teplotním rozsahu lze pro danou aplikaci považovat závislost napětí na teplotě za lineární.

Na trhu existuje velké množství integrovaných obvodů, které jsou přímo určeny pro zpracování signálu z termočládku. Tyto obvody umí kompenzovat teplotu studeného konce (cold junction temperature) a obvykle detekovat odpojení termočládku. Pro naše účely byl zvolen integrovaný obvod firmy Analog Devices AD8495 [18], a to kvůli poměrně velké rychlosti odezvy, jednoduchosti použití, přesnosti a širokému rozsahu napájecího napětí.

Zapojení zesilovače je uvedeno na obrázku (Obrázek 5.1) a vychází z doporučeného zapojení výrobce uvedeného v katalogovém listu integrovaného obvodu AD8495. Dle údajů výrobce je výstupní napětí obvodu AD8495 úměrné teplotě s převodní konstantou  $k_{OZ} = 5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$  a může dosahovat až hodnoty napájecího napětí. V případě, že na referenční pin č. 2 připojíme napětíovou referenci, můžeme měřit i záporné hodnoty teploty. My ovšem nepředpokládáme použití mikropáčky v mrazivých podmínkách, proto je pin č. 2 uzemněn. Dle údajů výrobce je závislost mezi výstupním napětím a měřenou teplotou dána vztahem:

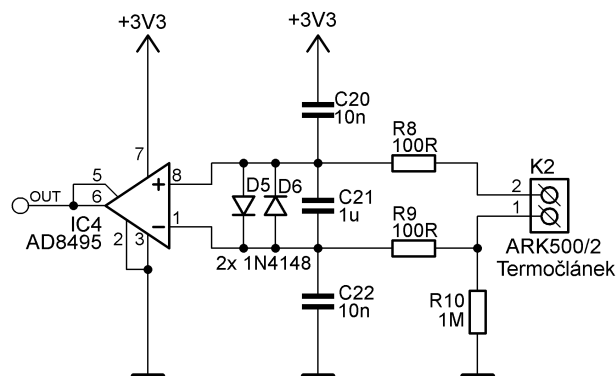
$$T = \frac{U_{OUT} - U_{REF}}{0,005} \quad [^\circ\text{C}; \text{V}, \text{V}/^\circ\text{C}] \quad (5.1)$$

V našem případě je  $U_{REF} = 0 \text{ V}$  a napájecí napětí 3,3 V, na základě vztahu (5.1) je maximální měřená teplota:

$$T_{MAX} = \frac{U_{OUT}}{0,005} = \frac{3,3}{0,005} = 660 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

Antialiasingový filtr složený z kapacitorů  $C_{20}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$  a rezistorů  $R_8$  a  $R_9$  je převzat z aplikačních poznámek firmy Analog Devices k obvodu AD849x. Antiparalelně

zapojená dvojice diod D<sub>5</sub> a D<sub>6</sub>, pak slouží jako ochrana vstupů OZ před přepětím při spínání výkonového tranzistoru MOSFET.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení zesilovače termočláňkového napětí

### 5.3 Napěťová reference

Atmega328 umožňuje volbu napěťové reference jako vnitřní  $U_{REF} = 1,1 \text{ V}$ , napájecí napětí procesoru  $U_{REF} = U_{CC}$  (v našem případě  $U_{CC} = 5 \text{ V}$ ) nebo externí.

Jelikož je vnitřní reference silně závislá na napájecím napětí, bylo by nutné vždy při stavbě mikropájky tuto hodnotu změřit a uložit kalibrační konstantu do MCU. Navíc převodní konstanta termočláňkového zesilovače je  $k_{OZ} = 5 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$ , z čehož plyne maximální změřená teplota:

$$T_{MAX-1,1V} = \frac{U_{REF}}{k_{OZ}} = \frac{1,1}{5 \cdot 10^{-3}} = 220 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.3)$$

Tato hodnota teploty je pro pájení standardní měkkou pájkou velice nízká. Při volbě reference, jako napájecího napětí, se dostáváme do situace, kdy využíváme jen omezený rozsah AD převodníku. Při předpokládané maximální teplotě hrotu  $T_{MAX, PŘED} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  dostáváme:

$$T_{MAX-1,1V} = \frac{U_{REF}}{k_{OZ}} = \frac{5}{5 \cdot 10^{-3}} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

$$V_{yužití\_ADC} = \frac{T_{MAX, PŘED}}{T_{MAX-UCC}} \cdot 100 = \frac{400}{1000} \cdot 100 = 40 \% \quad (5.5)$$

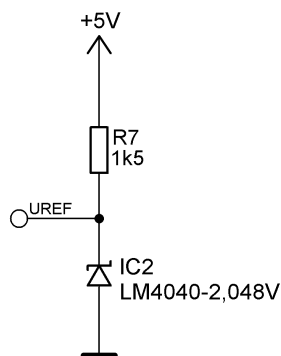
Jedinou volbou je tedy použití externí napěťové reference. Abychom si usnadnili práci při psaní řídicího softwaru, zvolíme napětí reference v násobcích  $2^n$ , kde  $n$  je 10, 11, 12 atd. Poté pro převod z čísla na napětí budeme jen násobit konstantou.

Hodnotu napěťové reference určíme:

$$U_{REF} = T_{MAX, PŘED} \cdot k_{OZ} = 400 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ V} \Rightarrow 2,048 \text{ V} \quad (5.6)$$

Zvolili jsme levnou napěťovou referenci v SMD provedení firmy Texas Instruments LM4040 [12] o referenčním napětí  $U_{REF} = 2,048 \text{ V}$ , která pro dané použití svými parametry naprosto dostačuje.

Zapojení vychází z katalogového listu (Obrázek 5.2).



Obrázek 5.2: Schéma zapojení napěťové reference

Výrobce doporučuje nepřekročit proud referencí 15 mA, proto byla s ohledem na ohřev protékajícím proudem zvolena hodnota proudu 2 mA. Poté předřadný rezistor  $R_7$  nastavíme:

$$R_7 = \frac{U_{CC} - U_{REF}}{I} = \frac{5 - 2,048}{2 \cdot 10^{-3}} = 1476 \, \Omega \Rightarrow E12 = 1500 \, \Omega \quad (5.7)$$

## 5.4 Zobrazovací LCD displej

Mezi hlavní nevýhody LCD displejů patří vyšší spotřeba a horší pozorovací úhly než u OLED displejů. Tyto jsou nevýhodné kvůli vysoké ceně a nižší životnosti.

Proto byl pro zobrazení údajů o teplotě hrotu mikropájky vybrán alfanumerický znakový LCD (Liquid Crystal Display) displej neboli displej z tekutých krystalů firmy Winstar s typovým označením WH0802A1 [8]. Jedná se o displej se 2 řádky a 8 sloupci, který je ovládán řadičem ST7066. Jedná se pouze o novější typ řadiče zpětně kompatibilního s velice známým a rozšířeným řadičem HD44780 firmy Hitachi [9].

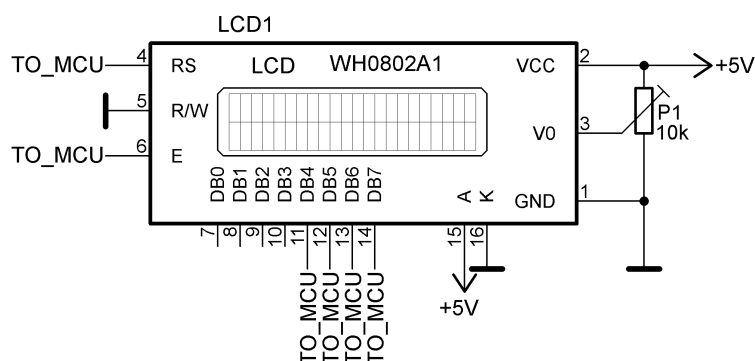
Zmíněný displej byl zvolen z toho důvodu, že znaková sada je již součástí paměti ROM řadiče, což ušetří značnou část flash paměti MCU. V případě chybějícího znaku je možné si vytvořit až 8 vlastních uživatelských znaků, které se nahrají do RAM paměti LCD. Další výhodou je široký rozsah napájecího napětí (2,7 – 5,5) V a také jednoduchá komunikace s mikrokontrolérem.

Popis vývodů LCD displeje je uveden v tabulce (Tabulka 5.1). Displej umožňuje 4bitovou nebo 8bitovou komunikaci. Z důvodu úspory vstupně výstupních portů použijeme 4bitovou komunikaci. To znamená, že nevyužijeme datové vodiče DB0 – DB3 (viz katalogový list). Dále nepředpokládáme čtení informací z displeje. Z toho tedy plyne, že pin 5 (R/W) připojíme na zem, čímž ušetříme další vstupně výstupní pin.

Tabulka 5.1: Zapojení vývodů LCD WH0802A1

| Pin | Symbol  | Popis                             |
|-----|---------|-----------------------------------|
| 1   | VSS     | Zem                               |
| 2   | VDD     | Napájecí napětí - doporučeno +5 V |
| 3   | VO      | Kontrast LCD                      |
| 4   | RS      | Výběr registru                    |
| 5   | R/W     | Čtení / zápis                     |
| 6   | E       | Povolovací signál                 |
| 7   | DB0     | Data                              |
| 8   | DB1     | Data                              |
| 9   | DB2     | Data                              |
| 10  | DB3     | Data                              |
| 11  | DB4     | Data                              |
| 12  | DB5     | Data                              |
| 13  | DB6     | Data                              |
| 14  | DB7     | Data                              |
| 15  | A - LED |                                   |
| 16  | K - LED |                                   |

Zapojení displeje je uvedeno na obrázku (Obrázek 5.3). Hodnota trimru P<sub>1</sub>, který slouží k nastavení kontrastu displeje, se dle katalogového listu řadiče ST7066 [11] volí v rozmezí (10 - 20) k $\Omega$ .



Obrázek 5.3: Zapojení LCD

## 5.5 Snižující měnič

Snižující měnič (Obrázek 5.5) byl zvolen, protože v zapojení pouze s tranzistorem a nulovou diodou (snížující měnič bez LC filtru) vzniká rušení v podobě proudových obdélníkových hran, které jsou tvořeny širokým spektrem harmonických složek. To vede k situaci, kdy se pájecí pero chová jako vysílací anténa. Měnič má tu výhodu, že pomocí střídý PWM ovládáme hodnotu výstupního napětí, které je na výstupu konstantní od (0 – 24) V.

Protože cílem této práce není konstrukce měniče, bude návrh proveden dosazením do finálních vzorců, které jsou i s odvozením velice podrobně popsány v odkazu [29].

### 5.5.1 Návrh tlumivky

Protože výrobci tlumivek uvádí velice chabé informace o nabízených produktech, je velice složité vypočítat (odhadnout), zda se zvolená tlumivka bude či nebude přesycovat. Proto je jednodušší návrh vlastní.

Nejprve je potřeba vypočítat hodnotu tlumivky.

$$L = \frac{U_d}{8 \cdot f_{PWM} \cdot \Delta I} \quad [H; V, Hz, A] \quad (5.8)$$

kde:  $U_d$       napájecí napětí  
 $f_{PWM}$     frekvence PWM  
 $\Delta I$       zvlnění proudu

Znamé jsou následující hodnoty:  $U_d = U_{PERA} = 24 V$ ;  $I = I_Z = 2,1 A$ . Frekvenci PWM je nutné zvolit co nejvyšší vzhledem k minimalizaci tlumivky. Dle katalogového listu dokáže Atmega328 [1] s frekvencí hodin 16 MHz, s předděličkou 1 a v 8bitovém módu „Fast PWM“ generovat maximální frekvenci PWM:

$$f_{PWM} = \frac{f_{CLK}}{N \cdot (1 + TOP)} \quad (5.9)$$

kde:  $f_{CLK}$     frekvence hodin mikrokontroléru  
 $N$         předdělička  
 $TOP$     maximální hodnota čítače/časovače

Dosazení do (5.9):

$$f_{PWM} = \frac{f_{CLK}}{N \cdot (1 + TOP)} = \frac{16 \cdot 10^6}{1 \cdot (1 + 255)} = 62,5 kHz \quad (5.10)$$

Zvlnění proudu se zpravidla volí okolo 10 % z požadované hodnoty.

$$\Delta I = I \cdot 0,1 = 2,1 \cdot 0,1 = 0,21 A \Rightarrow 0,2 A \quad (5.11)$$

Dosazení do (5.8):

$$L = \frac{U_d}{8 \cdot f_{PWM} \cdot \Delta I} = \frac{24}{8 \cdot 62500 \cdot 0,2} = 240 \mu H \quad (5.12)$$

Z frekvence spínání je jasné, že bude nutné použít tlumivku s feritovým jádrem se vzduchovou mezerou. Průřez jádra určíme ze vztahu:

$$S_j = \sqrt{\frac{L \cdot I_{MAX} \cdot I_{ef}}{B_{MAX} \cdot \sigma \cdot k_{p,Fe} \cdot k_{p,Cu}}} \quad [\text{m}^2 ; \text{H}, \text{A}, \text{T}, \text{A/m}^2] \quad (5.13)$$

kde:

- L indukčnost cívky
- $I_{MAX}$  maximální proud na výstupu
- $I_{ef}$  efektivní hodnota proudu na výstupu, kdy pro malé zvlnění proudu můžeme uvažovat  $I_{MAX} = I_{ef}$
- $B_{MAX}$  magnetická indukce, která se pro ferit volí cca 0,32 T
- $\sigma$  proudová hustota, která se volí cca  $3,5 \text{ A/mm}^2 = 3,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
- $k_{p,Fe}$  činitel plnění feritu, který se volí 1
- $k_{p,Cu}$  činitel plnění mědi, který se volí 0,45

Nyní je nutné určit maximální proud tlumivkou, který je dán v nejhorším možném případě následující rovnicí.

$$I_{MAX} = I + \Delta I = 2,1 + 0,2 = 2,3 \text{ A} \quad (5.14)$$

Dosazením do rovnice (5.13) určíme přibližný průřez jádra.

$$S_j = \sqrt{\frac{L \cdot I_{MAX} \cdot I_{ef}}{B_{MAX} \cdot \sigma \cdot k_{p,Fe} \cdot k_{p,Cu}}} = \sqrt{\frac{240 \cdot 10^{-6} \cdot 2,3^2}{0,32 \cdot 3,5 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 0,45}} = 50,2 \text{ mm}^2 \quad (5.15)$$

Vhodné jádro, pak nabízí firma TME [31] s označením E25/13/7-3C90 [30]. Důležité parametry (viz Tabulka 5.2).

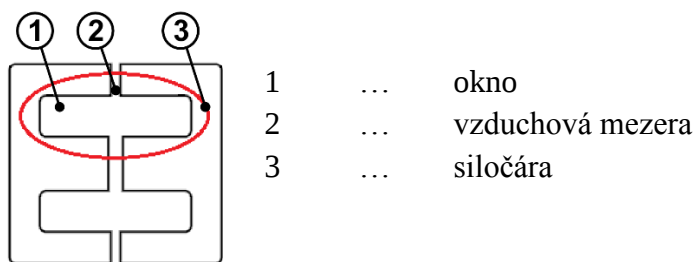
Tabulka 5.2: Parametry zvoleného feritového jádra

|                                                  |                      |
|--------------------------------------------------|----------------------|
| <b>Výrobce</b>                                   | Ferroxcube           |
| <b>Typ jádra</b>                                 | feritové             |
| <b>Tvar jádra</b>                                | E                    |
| <b>Materiál</b>                                  | 3C90                 |
| <b>Koeficient indukčnosti Al</b>                 | 1900 nH              |
| <b>Efektivní objem jádra (<math>V_e</math>)</b>  | 2990 mm <sup>3</sup> |
| <b>Efektivní průřez jádra (<math>A_e</math>)</b> | 52 mm <sup>2</sup>   |

Počet závitů tlumivky určíme ze vztahu:

$$N = \frac{L \cdot I_{MAX}}{B_{MAX} \cdot S_{FE}} = \frac{240 \cdot 10^{-6} \cdot 2,3}{0,32 \cdot 52 \cdot 10^{-6}} = 33 \text{ závitů} \quad (5.16)$$

Délku siločáry ve feromagnetiku určíme z rozměrů zvoleného jádra, tak jak zachycuje Obrázek 5.4.



Obrázek 5.4: Siločára ve feromagnetiku

V našem případě je délka siločáry  $l_{Fe} = 64$  mm. Délku vzduchové mezery vypočítáme:

$$l_v = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I_{MAX}}{B_{MAX}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} \quad (5.17)$$

kde:  $\mu_0$  permeabilita vaku  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$   
 $l_{Fe}$  délka siločáry ve feromagnetiku  
 $\mu_{rFe}$  relativní permeabilita feritu, která klesá s rostoucí indukcí B  
(proto se volí  $\mu_{rFe} = 500 - 1500$ )

Dosazení do (5.17).

$$l_v = \frac{N \cdot \mu_0 \cdot I_{MAX}}{B_{MAX}} - \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} = \frac{33 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,3}{0,32} - \frac{64 \cdot 10^{-3}}{1500} = 0,26 \text{ mm} \quad (5.18)$$

Z Obrázek 5.4 je patrné, že siločára prochází přes vzduchovou mezeru dvakrát, proto je nutné při realizaci tlumivky vypočítanou hodnotu vzduchové mezery  $l_v$  brát poloviční.

Průřez vodiče lze určit:

$$S_{CU} = \frac{S_o \cdot k_{p,Cu}}{N} = \frac{87 \cdot 10^{-6} \cdot 0,45}{33} = 1,19 \text{ mm}^2 \Rightarrow 1 \text{ mm}^2 \quad (5.19)$$

Nyní zpětně určíme proudovou hustotu vodiče.

$$\sigma = \frac{I_{MAX}}{S_{CU}} = \frac{2,3}{1 \cdot 10^{-6}} = 2,3 \text{ A/mm}^2 \quad (5.20)$$

Z toho plyne, že výsledná cívka bude lehce předimenzovaná a tím pádem se bude lépe chladit.

## 5.5.2 Návrh filtračního kapacitoru

Pro výpočet kapacitoru je nutné si stanovit zvlnění napětí  $\Delta U$ , zpravidla se volí u takovýchto typů měničů hodnota (10 – 100) mV.

$$C = \frac{\Delta I}{8 \cdot f_{PWM} \cdot \Delta U} = \frac{0,2}{8 \cdot 62500 \cdot 0,01} = 40 \mu F \quad (5.21)$$

Pro výslednou realizaci použijeme dva elektrolytické kondenzátory 22  $\mu\text{F}$  s nízkým sériovým odporem zapojené paralelně tak, jak je vidět na Obrázek 5.5. Protože elektrolytické kapacity mají špatné filtrační vlastnosti ve vysokofrekvenční oblasti, jsou právě z tohoto důvodu použity keramické kapacity  $C_{23}$  a  $C_{24}$ , neboť slouží ke zlepšení navrhovaného filtru. Jejich kapacita není nikterak důležitá, zpravidla se volí v rozmezí (0,1 – 1)  $\mu\text{F}$ .

Jako poslední je třeba z Thomsonova vztahu ověřit, zda rezonanční kmitočet filtru  $f_0$  leží mimo pracovní kmitočet  $f$ .

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_3 \cdot (C_{25} + C_{26})}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{240 \cdot 10^{-6} \cdot 44 \cdot 10^{-6}}} = 1548 \text{ Hz} \quad (5.22)$$

### 5.5.3 Výběr polovodičů měniče

Nulová dioda  $D_7$  má za úkol ochránit výkonový tranzistor při přepětí, které způsobí indukčnost  $L_3$ . Protože dioda nebude umístěna na chladiči, provedeme její dimenzování na špičkovou hodnotu proudu, která je rovna proudu zátěže  $I_{D,SP} = I_Z$ . Hodnotu zatěžovacího proudu určíme z výkonu perla  $P = 50 \text{ W}$  a napájecího napětí  $U_{NAP} = 24 \text{ V}$ :

$$I_Z = \frac{P}{U_{NAP}} = \frac{50}{24} = 2,08 \text{ A} \Rightarrow 3 \text{ A} \quad (5.23)$$

Napětově se pak dioda dimenzuje alespoň na 2x vyšší napětí, než je napětí zátěže  $U_Z = 24 \text{ V}$ .

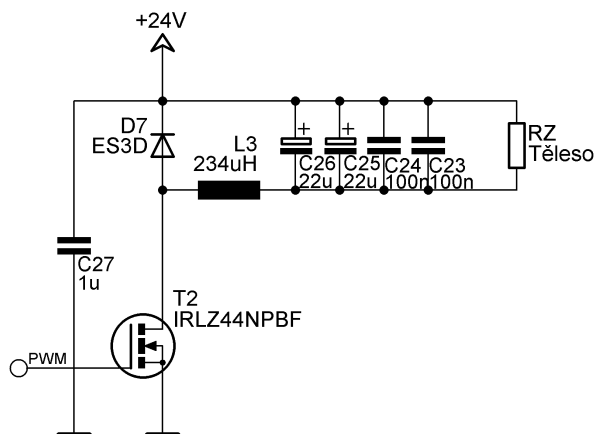
$$U_{D,MIN} = 2 \cdot U_Z = 2 \cdot 24 = 48 \text{ V} \quad (5.24)$$

Tento požadavek splňuje většina vyráběných diod. Pro realizaci byla vybrána, tzv. Schottkyho dioda v SMD provedení s označením ES3D 200 V/3 A.

Pro zajištění optimální funkce tranzistoru MOSFET je nutné přivést patřičné napětí na mřížku  $U_{GS} = (12 - 20) \text{ V}$  (dle katalogového listu výrobce). Při dodržení tohoto napětí výrobce garantuje nejnižší odpor v sepnutém stavu tzv.  $R_{DS(on)}$ , od kterého se mimo jiné odvíjí ztrátový výkon na spínacím prvku. Pro vypnutí (zavření) tranzistoru je nutné přivést stejný, nebo záporný napětíový potenciál  $U_{GS}$ .

Řídicí napětíové pulzy na mřížku G MOSFETu bude obstarávat mikrokontrolér pomocí PWM, jejíž napětíová úroveň je dána napájecím napětím procesoru, v našem případě  $U_{CC} = U_{PWM} = 5 \text{ V}$ . Při tomto napětí se standardní MOSFET není schopen plně otevřít, proto byl zvolen spínací tranzistor z řady logic level, což jsou MOSFETy určeny pro spínání logickými úrovněmi.

Pro dimenzování tranzistoru platí podobné zákonitosti jako pro dimenzování diody. S ohledem na tuto skutečnost byl zvolen MOSFET IRLZ44 [6].



Obrázek 5.5: Schéma zapojení step-down měniče

### 5.5.4 Realizace tlumivky

Pro zakoupenou kostru tlumivky bylo vytvořeno z kusu dřevěného hranolu jádro, které sloužilo k zamezení deformace či prasknutí kostry při navíjení drátu. Následně po navinutí potřebného počtu závitů byla cívka přetažena lepicí páskou proti rozmotání. Potřebná vzduchová mezera byla vytvořena pomocí kancelářského papíru o vyšší gramáži. Pohled na realizovanou tlumivku zachycuje Obrázek 5.6.



Obrázek 5.6: Pohled na vyhotovenou tlumivku

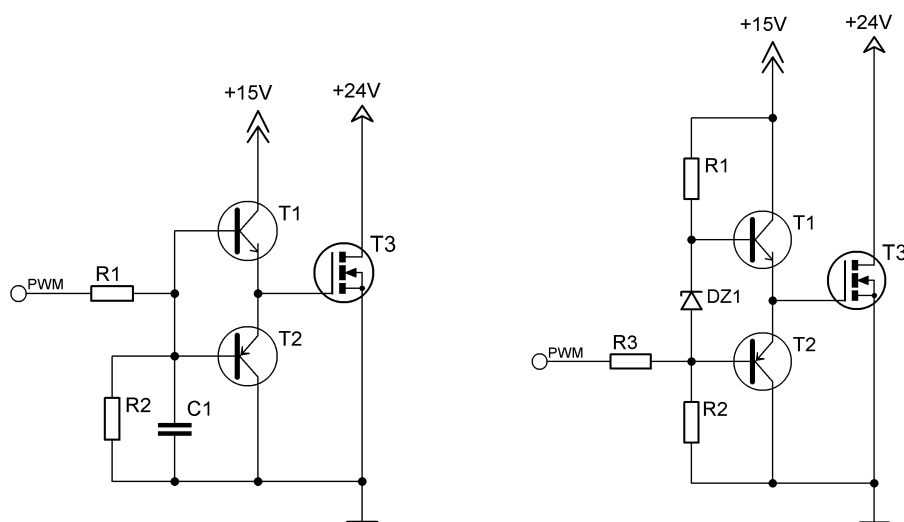
### 5.5.5 Budič tranzistoru

Výhodou tranzistoru MOSFET oproti bipolárním je ten, že jej lze ovládat napětím, nikoli proudem. Proud je potřebný pouze pro nabití parazitní kapacity  $C_{GS}$ . Hodnotu předřadného rezistoru  $R_G$ , který slouží právě pro nabití kapacity hradla, uvádí výrobce [6]. V našem případě  $R_G = 25 \Omega$  z řady E12  $\Rightarrow R_G = 27 \Omega$ .

V případě použití  $R_G = 27 \Omega$  bude mít proud tekoucí do elektrody G hodnotu:

$$I_{G,MAX} = \frac{U_{PWM}}{R_G} = \frac{5}{27} = 185,19 \text{ mA} \quad (5.25)$$

Tuto hodnotu proudu není pin mikrokontroléru schopen dodat. Proto je třeba před tranzistor MOSFET zařadit výkonový budič. Řešením je použití dvou tranzistorů zapojených buď jako emitorový sledovač, nebo jako komplementární zapojení s kolektorovým výstupem (viz Obrázek 5.7).



Obrázek 5.7: Spínač v zapojení emitorový sledovač / komplementární zapojení (převzato z [40])

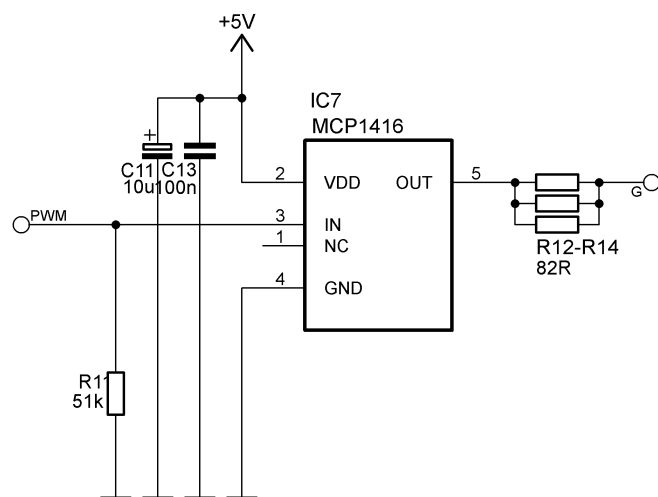
Jelikož podobné nebo stejné zapojení obsahuje většina vyráběných MOSFETových budičů, byl pro naše účely zvolen výkonový budič firmy Microchip MCP1416 [19], především kvůli nízkým ovládacím proudům, ceně a provedení pro spínání jednoho MOSFETu.

Zapojení vychází z katalogového listu (Obrázek 5.8). Rezistor  $R_1$  slouží k uzavření MOSFETU a definování stavu obvodu  $IC_7$  při nahrávání nového řídicího programu do mikrokontroléru, kdy všechny binární piny přecházejí do stavu vysoké impedance. Jeho hodnota byla určena s ohledem na maximální odebíraný proud z výstupu MCU, který by neměl překročit hodnotu 40 mA/pin a 200 mA na všechny výstupy. Výrobce budiče uvádí nejvyšší proud při logické jedničce, a to 1,1 mA, aby nebyl zbytečně zatěžován procesor, byla zvolena hodnota proudu rezistorem  $I_{R1} = 0,1 \text{ mA}$ . Hodnotu rezistoru pak určíme:

$$R_1 = \frac{U_{PWM}}{I_{R1}} = \frac{5}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ k}\Omega \Rightarrow E12 = 51 \text{ k}\Omega \quad (5.26)$$

Maximální proud je pak:

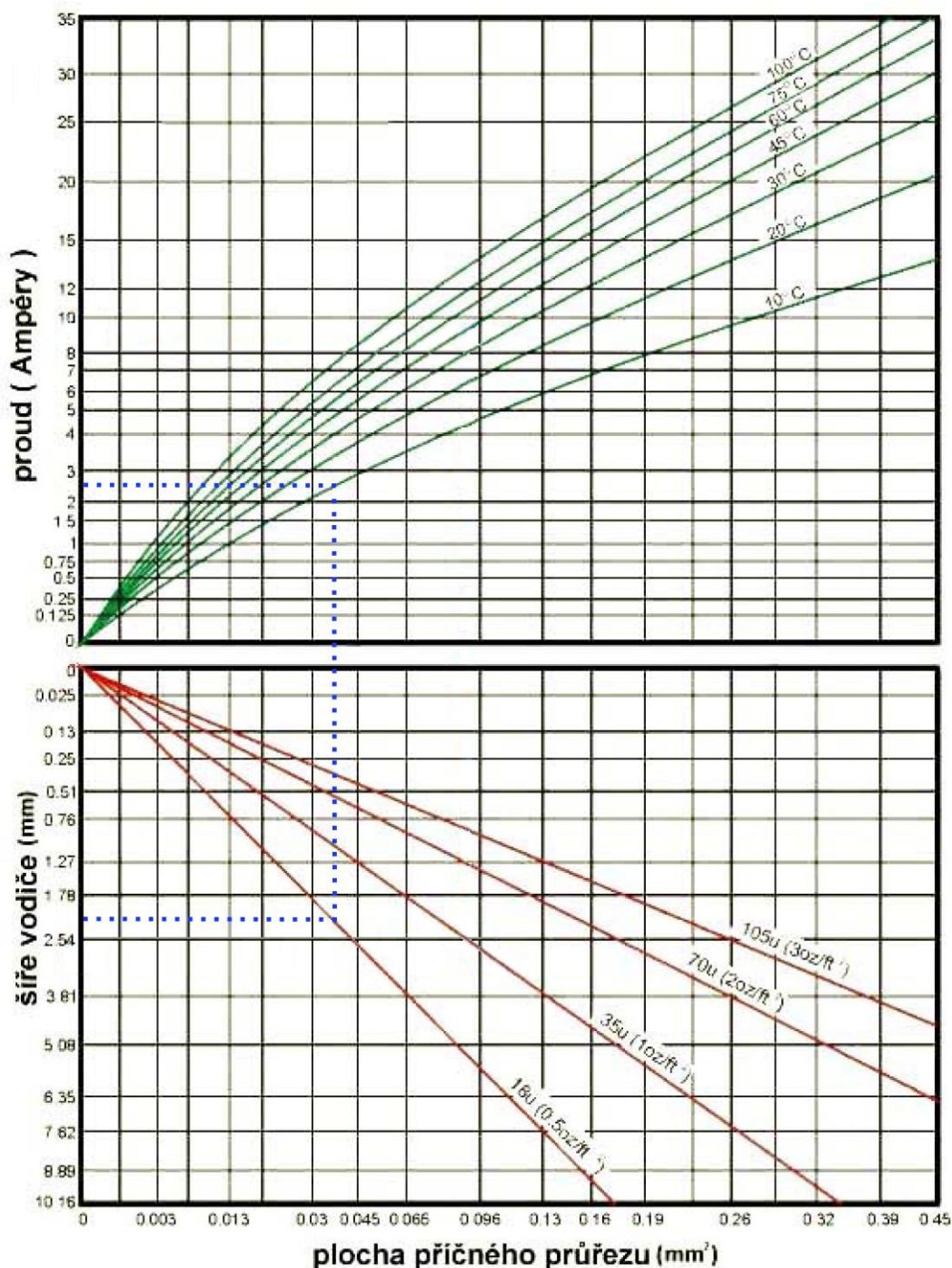
$$I_{PIN,PWM} = I_{R1} + I_{MAX,IC1} = (0,1 + 1,1) \cdot 10^{-3} = 1,2 \text{ mA} \quad (5.27)$$



Obrázek 5.8: Schéma zapojení budiče výkonového tranzistoru

### 5.5.6 Návrh tloušťky spoju výkonové části měniče

Jelikož se jedná o výkonovou část zařízení, je nutné stanovit minimální sílu cest na plošném spoji. Tu určíme z grafu (Obrázek 5.9). K dostupným údajům patří maximální proud  $I_{MAX} = 2,3 \text{ A}$  (dáno zvoleným perem a rezervou), maximální teplotní nárůst  $10^\circ\text{C}$  a síla měděné fólie na plošném spoji  $18 \mu\text{m}$ , která je dána technologií výroby DPS (pool servis) od firmy Pragoboard. Po zanesení těchto údajů do grafu (modře) dostáváme sílu vodiče zhruba  $2,18 \text{ mm} \sim 86 \text{ mil}$ .

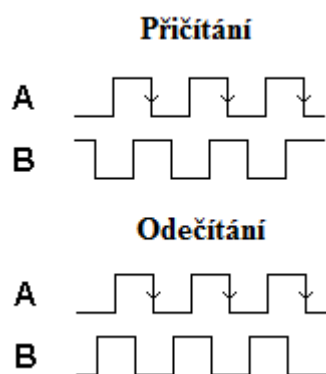


Obrázek 5.9: Dovolené proudové zatížení vodiče (převzato a upraveno z [33])

## 5.6 Rotační enkodér

Rotační enkodér je mechanické, nebo elektro-mechanické zařízení, které převádí otáčivý pohyb na obdélníkové pulzy či sinusové průběhy, které se většinou upraví tvarovačem opět na obdélníkové pulzy. Můžeme je rozdělit na mechanické, optické a magnetické, dále pak na inkrementální a absolutní. Enkodéry se používají jako snímače otáček, vzdálenosti a pozice. Především nacházejí uplatnění ve spotřební elektronice, jako jsou myši k počítači (kolečko), nastavení hlasitosti rádií atd. V průmyslu pak tvoří zpětnou vazbu pohonů, kde se kvůli přesnosti a delší životnosti používají výhradně optické nebo magnetické enkodéry.

Mechanické rotační enkodéry se vyrábí bez polovodičových prvků a elektroniky, obvykle na jednu otáčku generují (10 – 100) pulsů. Mívají dva výstupy označované jako A a B, u nichž je sled impulzů fázově posunut o 90 ° (viz Obrázek 5.10), aby bylo možné detekovat směr otáčení [41], [42].



Obrázek 5.10: Výstupní signál z digitálního enkodéru (převzato a upraveno z [43])

Vyhodnocení probíhá tak, že se sleduje jeden z výstupů, například A, a při sestupné, nebo náběžné hraně pak kontrolujeme druhý výstup. Následně pak přičteme, nebo odečteme obsah čítače [43].

Nevýhodou mechanických enkodérů je menší výdrž způsobená opotřebením mechaniky kontaktů a generování falešných pulzů (zákmitů) na výstupech, které roste s opotřebením. S tím je nutné se vypořádat.

Pro realizaci mikropájky byl vybrán mechanický enkodér s axiálním tlačítkem firmy Alps EC12E2424407 [22], který je díky tlačítku vhodný pro ovládání menu.

Výrobce uvádí výdrž 15 000 cyklů otočení, což je v porovnání s optickými typy enkodérů, u kterých výrobce garantuje kolem 1 000 000 cyklů, velice špatné. Bohužel se nepodařilo sehnat optický enkodér s axiálním tlačítkem, proto byl zvolen mechanický typ. Navíc se nepředpokládá časté otáčení (změna teploty), protože bude mít uživatel možnost si nastavit a uložit teplotu do EEPROM, ze které se následně teplota při spuštění mikropájky načte.

### 5.6.1.1 Připojení rotačního enkodéru k mikrokontroléru

Výsledné schéma zapojení ukazuje Obrázek 5.11. Pro co nejnižší opotřebenění enkodéru je nutné dodržet údaje udávané výrobcem, což znamená, že napájecí napětí bude 5 VDC

$$R_{15-17} = \frac{U_{CC}}{I_{R15-17}} = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3}} = 5 \text{ k}\Omega \Rightarrow E12 = 4,7 \text{ k}\Omega \quad (5.28)$$
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R_{18} \cdot C_{30}} = \frac{1}{2\pi \cdot 10000 \cdot 22 \cdot 10^{-9}} = 723 \text{ Hz} \quad (5.29)$$
[illegible]

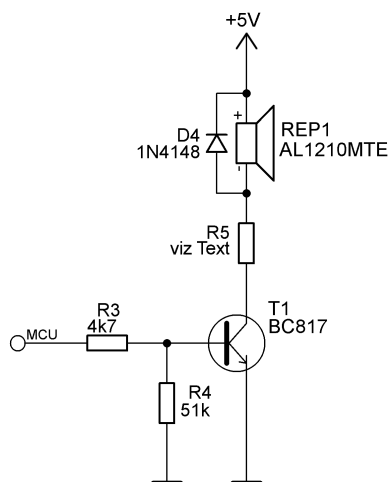
Výsledné zapojení (viz schéma Obrázek 5.12) zvolené piezosirény AL2320MTE [27] je modifikací doporučení výrobce, který udává maximální proud 60 mA při napětí (3 – 7) V. Pro výpočet rezistorů je nutné znát proudový zesilovací činitel tranzistoru ( $T_1$ ), který udává výrobce  $h_{21E} = 100 - 250$  (volíme střední hodnotu  $h_{21E} = 175$ ) a kolektorový proud  $I_C = 60$  mA, který je dán zátěží. Minimální proud do báze určíme:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21F}} = \frac{60 \cdot 10^{-3}}{175} = 342,86 \mu A \quad (5.30)$$

Výsledný bázevý proud zvolíme  $I_B = 1 \text{ mA}$ . Vyšší proud do báze tranzistoru je zvolen záměrně, jednak kvůli dosažení optimální polohy pracovního bodu, a tím i eliminaci spínacích ztrát, a také kvůli univerzálnosti použití (uživatel použije sirénu, kterou má doma). Pro navrženou sirénu se rezistor  $R_5$  nahradí zkratem (propojkou  $0 \Omega$ ). V případě použití jiné sirény je nutné v katalogovém listu výrobce ověřit její mezní parametry a případně provést korekci hodnoty rezistoru  $R_5$  dle Ohmova zákona. Rezistor  $R_4$  slouží k zavření tranzistoru při nahrávání řídicího programu do MCU, kdy všechny binární piny přechází do stavu vysoké impedance. Proto se proud tímto rezistorem volí co nejmenší, to znamená, že jej můžeme zanedbat. Rezistor  $R_3$  pak určíme:

$$R_3 = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0,7}{1 \cdot 10^{-3}} = 4k3 \Rightarrow E12 = 4k7 \quad \text{b} \quad (5.31)$$

Rezistor  $R_3$  4k3 byl nahrazen rezistorem 4k7, protože tyto rezistory jsou v zapojení již použity a proud báze bude i tak dostatečně předimenzován. Rezistor  $R_4$  pak zvolíme řádově větší a opět ze stejného důvodu jako u  $R_3$  volíme  $R_4 = 51 \text{ k}\Omega$ . Dioda  $D_4$  slouží k ochraně tranzistoru před indukčností zátěže v podobě piezosirény či malého reproduktoru.



Obrázek 5.12: Schéma zapojení zvukové signalizace

## 5.8 Komunikace s počítačem

Protože procesor nedisponuje žádnou periferií pro ladění programu, a rovněž bude nutné identifikovat soustavu pájecího pera v prostředí Matlab, je potřebné zajistit komunikaci s PC.

Dnes je málokterý stolní či osobní počítač vybaven sériovým portem RS232. Musíme tedy zajistit komunikaci po USB sběrnici. Existuje více možností, jak tuto komunikaci zajistit:

- softwarová emulace USB,
- převodník USART => USB,
- převodník USART => RS232 (klasická PC úroveň  $\pm 12$ ) => komerčně vyráběný převodník.

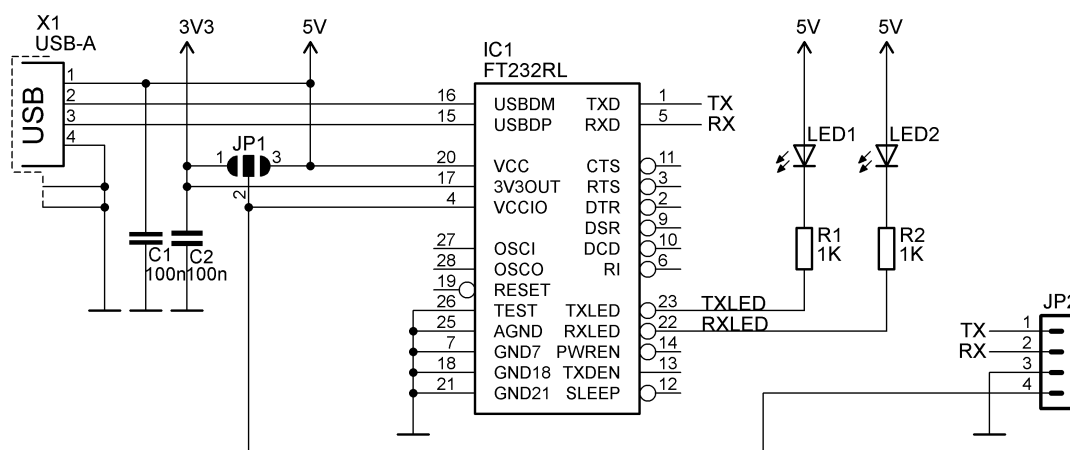
V prvním případě existuje spousta softwarových implementací USB. Za zmínku stojí AVR-USB, který je volně šiřitelný pod licencí GNU GPL, alternativně pod komerční licencí. Nicméně při testech na kontaktním poli se tato metoda neosvědčila. Důvodem byla nespolehlivost komunikace na více zařízeních.

V druhém případě se pro převod používají velmi známé převodníky od firmy FTDI, například FT232RL (3,77 €<sup>2</sup>) [13], ale na trhu existují i jiní výrobci EXAR, Texas Instruments atp.

V třetím případě se používají převodníky úrovní z TTL logiky (+5 V) na logiku RS232 ( $\pm 12$  V). To lze zajistit například obvodem firmy Maxim Integrated MAX232 [20] (0,90 €<sup>2</sup>) nebo MAX3222 [21] (2,16 €<sup>2</sup>) atd. Dále následuje převodník RS232 => USB, který obsahuje výše zmíněné integrované obvody (MAX232 => FT232).

Protože můj PC neobsahuje sériový konektor (RS232) byl pro finální řešení zvolen výše zmíněný integrovaný obvod firmy FTDI především z důvodů přijatelné ceny a jednoduchosti použití. Tato část zapojení je určena pouze k vývojovým účelům (kterou by potenciální uživatel neměl jak využít). Byla zvolena varianta umístění převodníku na externí desku plošného spoje.

Zapojení vychází opět z katalogového listu a je zobrazeno na Obrázek 5.13.



Obrázek 5.13: Zapojení komunikace s PC

LED diody LED 1 a 2 slouží pro zobrazení toku dat. Propojka JP1 je určena pro volbu komunikační úrovně 3,3 V nebo 5 V (obecně zle komunikační úroveň volit napětím přivedeným na pin 4 VCCIO). Kapacitory C<sub>1</sub> a C<sub>2</sub> jsou určeny k blokování napájecího napětí.

## 5.9 Napájecí obvody

Pro napájení mikropáčky je potřeba zajistit dvě napájecí napětí:

- napětí 24 V s výkonem 50 W pro pájecí pero,
- napětí 5 V s výkonem do 2 W pro napájení číslicových obvodů.

<sup>2</sup> uvedené ceny jsou aktuální k 27. 4. 2015 u firmy Mouser [17].

Existuje více variant jak těchto požadavků dosáhnout, mezi ty jednodušší patří:

- použití transformátoru s patřičnou hodnotou střídavého sekundárního napětí, které se usměrní pomocí Grätzova usměrňovače a následně vyfiltruje kapacitorem (Obrázek 5.14),
- průmyslový měnič napětí AC / DC (střídavý / stejnosměrný).

## 5.9.1 Návrh zdroje s transformátorem

### 5.9.1.1 Výběr síťového transformátoru

Hodnotu sekundárního efektivního napětí  $U_{SEK, EF}$  vinutí musíme volit s ohledem na napájecí napětí zvoleného pájecího pera. To znamená, že hodnota napětí na filtračním kapacitoru musí být rovna střední hodnotě jmenovitého napětí zvoleného pájecího pera  $U_{STŘ} = 24 \text{ V}$ , a ta musí být rovna amplitudě  $U_a$  za usměrňovačem bez filtračního kapacitoru. Poté můžeme určit efektivní hodnotu napětí za usměrňovačem (bez kapacitoru):

$$U_{EF} = \frac{U_a = U_{STŘ}}{\sqrt{2}} = \frac{24}{\sqrt{2}} = 16,97 \text{ V} \quad (5.32)$$

Abychom získali napětí na transformátoru, musíme přičíst úbytek napětí na diodách (pro jednu půlvlnu vždy vedou dvě diody  $U_{2D} = 1,4 \text{ V}$ )

$$U_{EF,TR} = U_{EF} + U_{2D} = 16,97 + 1,4 = 18,37 \text{ V} \quad (5.33)$$

Z toho plyne, že potřebujeme síťový transformátor se sekundárním vinutím  $U_{EF,TR} = 18 \text{ V}$  a výkonovým zatížením o něco vyšším než je proud potřebný pro vytopení pera, tzn.  $P_{TR} = 70 \text{ VA}$ . Vhodný transformátor nabízí např. firma Talema s označením 55132-P1S2.

### 5.9.1.2 Volba filtračního kapacitoru

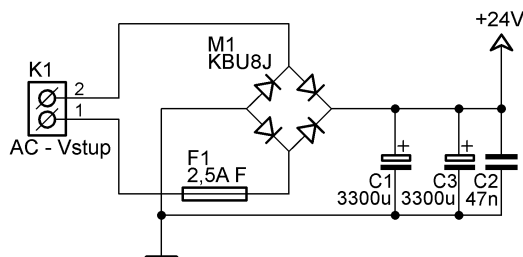
Pro výpočet je nutné si nejprve stanovit tvrdost filtru a maximální hodnotu zvlnění výstupního napětí, kterou požadujeme co nejvyšší. Aby nevycházela nesmyslná hodnota kapacitoru, volí se v praxi zvlnění cca 5 % z napájecího napětí. Dle [48] pak platí:

$$C = \frac{k \cdot I_Z}{p \cdot U_{NAP}} \quad [\mu\text{F} ; -, \text{mA}, \%, \text{V}] \quad (5.34)$$

|      |           |                                                          |
|------|-----------|----------------------------------------------------------|
| kde: | C         | kapacita kapacitoru ve filtru                            |
|      | k         | konstanta, která je pro dvoucestné usměrňovače $k = 300$ |
|      | $I_Z$     | proud zátěží                                             |
|      | p         | činitel zvlnění                                          |
|      | $U_{NAP}$ | výstupní stejnosměrné napětí                             |

Ke známým údajům patří maximální proud  $I_{MAX} = 2,3 \text{ A}$  a napájecí napětí  $U_{NAP} = 24 \text{ V}$  (dáno zvoleným perem a rezervou). Dosazením do (5.34) dostáváme:

$$C = \frac{k \cdot I_Z}{p \cdot U_{NAP}} = \frac{300 \cdot 2300}{5 \cdot 24} = 5750 \mu F \Rightarrow 2 \times 3300 \mu F \quad (5.35)$$



Obrázek 5.14: Výsledné schéma zapojení zdroje 24 V s transformátorem

## 5.9.2 Zdroj s průmyslovým měničem napětí

V případě použití měniče napětí odpadá nutnost použití filtračního kapacitoru i usměrňovače, protože jsou již jeho součástí. Dále jsou měniče vybaveny zpětnovazebním obvodem, který je schopen udržet téměř konstantní výstupní napětí při změně zatěžovacího odporu. Cena těchto měničů se pohybuje od 300 po 1 000 CZK v závislosti od výkonu a výrobce.

Vhodný měnič pak určíme dle napájecího napětí a výkonového zatížení zvoleného napájecího pera ( $U = 24 \text{ V}$ ,  $P = 50 \text{ W}$ ). Tyto požadavky splňuje průmyslový měnič výrobce Carspa s typovým označením HS-60/24 [28].

Vzhledem k příznivé ceně a svým parametrům byl tento měnič zvolen jako finální zdroj pro silovou část zařízení.

## 5.9.3 Stabilizace napájecího napětí pro číslicové obvody

Lineární stabilizátory (LDO) typu 78xx dosahují velice nízké účinnosti při větším rozdílu vstupního a výstupního napětí (v našem případě  $U_{IN} = 24 \text{ V}$ ,  $U_{OUT} = 5 \text{ V}$ ). Pokud bychom odebírali například  $I_Z = 100 \text{ mA}$  (reálný proud bude nejspíše vyšší), dostáváme výkon na zátěži:

$$P_{OUT} = U_{OUT} \cdot I_Z = 5 \cdot 0,1 = 0,5 \text{ W} \quad (5.36)$$

Výkon, který se promění na stabilizátoru na teplo:

$$P_{ZTR} = (U_{IN} - U_{OUT}) \cdot I_Z = (24 - 5) \cdot 0,1 = 1,9 \text{ W} \quad (5.37)$$

Výkon na vstupu je součet ztrátového a výstupního výkonu:

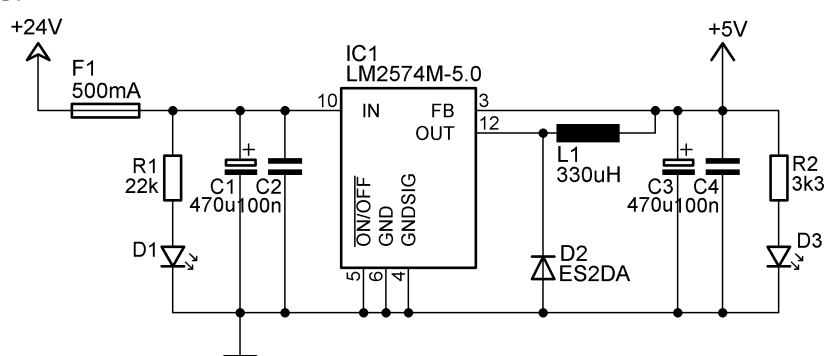
$$P_{IN} = P_{OUT} + P_{ZTR} = 0,5 + 1,9 = 2,4 \text{ W} \quad (5.38)$$

Účinnost stabilizátoru je pak podílem výstupního výkonu ke vstupnímu:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100 = \frac{0,5}{2,4} \cdot 100 = 20,83 \% \quad (5.39)$$

To je důvodem pro použití měniče napětí v monolitickém SMD pouzdru SO14W s označením LM2574M-5 [23], který dle katalogu výrobce dosahuje účinnosti okolo 75 % při výstupním proudu  $I_{OUT} = 0,5 \text{ A}$ .

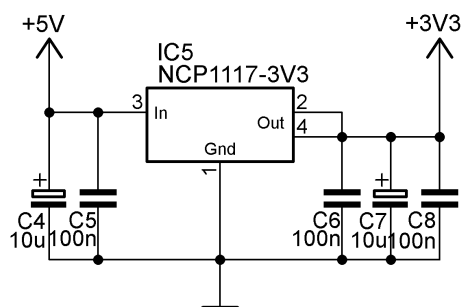
Výstupní filtr byl navržen dle doporučení výrobce a je velice důležité dát si pozor při výběru tlumivky tak, aby nemohlo dojít k jejímu přesycení. V katalogovém listu spínaného měniče výrobce uvádí běžně dostupné a otestované tlumivky, které zaručí dosažení uvedených vlastností spínaného zdroje. Výsledné schéma zobrazuje Obrázek 5.15.



Obrázek 5.15: Výsledné schéma zapojení zdroje pro číslicové obvody

## 5.9.4 Stabilizace napájecího napětí pro analogové obvody

Z důvodu co nejúčinnější eliminace rušení z napájecí větve byl vytvořen zdroj oddělující analogové napájení od digitálního. Zapojení vychází z katalogového listu lineárního stabilizátoru IC<sub>5</sub> (NCP1117) [32] a je zachyceno na Obrázek 5.16.



Obrázek 5.16: Výsledné schéma zapojení pro analogové obvody

## 6 REALIZACE

### 6.1 Mechanické uspořádání

Celé zařízení je navrženo, až na výjimky, kompletně v SMD provedení na dvouvrstvé desce plošných spojů, a to z důvodu lepší možnosti tažení napájecích cest, analogových cest a blokování napájení integrovaných obvodů.

Pro návrh plošného spoje byly uvažovány dvě varianty řešení:

- LCD a rotační enkodér se připojí pomocí plochých kabelů k hlavní desce, která bude připevněna přes distanční sloupky ke dnu krabičky,
- vše bude součástí hlavní řídicí desky, která se připevní k přednímu panelu.

Jako finální verze byla zvolena druhá varianta, a proto bylo nutné při návrhu začít rozložením LCD displeje a rotačního enkodéru. Následně byly rozmístěny veškeré konektory, které slouží pro připojení pájecího pera, přeprogramování řídicího mikrokontroléru atd. Dále bylo nutné co nejvíce prostorově eliminovat rušení od indukčnosti měničů, proto byla analogová část i s napájením umístěna do spodní vrstvy plošného spoje. Zbytek součástek je součástí horní vrstvy DPS. Dalším kritériem návrhu byla minimalizace rozptylové indukčnosti u snižujícího měniče, která vzniká na dráze výkonový tranzistor, dioda, kapacitor, a to co nejkratším vedením cest, které tyto součásti spojují.

Výsledný motiv plošného spoje o rozměrech (70 x 90) mm je zobrazen v příloze D.

Celé zařízení by mohlo být umístěno například v krabičce SC-12100 [10], výrobce Bud Industries. Vnější rozměry krabičky jsou (108 x 127 x 125) mm, vnitřní pak (100 x 125 x 123) mm, (výška x šířka x hloubka), zkosení čelní strany činí 20 °. Vzhledem k vysoké ceně 1660 CZK s DPH<sup>3</sup> by alternativou mohla být krabička KK12-121 s cenovkou 279 CZK<sup>4</sup> o vnějších rozměrech (119 x 124 x 217) mm a vnitřních rozměrech (111 x 118 x 202) mm, (šířka x výška x hloubka).

### 6.2 Osazení desky plošných spojů a oživení elektronických obvodů

Při osazování DPS, kde jsou použity součástky citlivé na ESD, je vždy vhodné použít zemní kroužek na ruku, abychom předešli zničení mnohdy i drahých součástek. Doporučený osazovací postup je následující:

- důležité je začít osazením napájecí části MCU a logických obvodů, konkrétně součástky IC<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, L<sub>1</sub>, C<sub>4</sub>,

---

<sup>3</sup> uvedené ceny jsou aktuální k 27. 4. 2015 u firmy Mouser [17].

<sup>4</sup> uvedené ceny jsou aktuální k 27. 4. 2015 u firmy EZK [14].

- po osazení této části připojíme na vstup monolitického měniče IC<sub>1</sub> napájecí napětí 24 V z laboratorního zdroje a zkontrolujeme, že je na výstupu měniče stabilní napětí 5 V, současně kontrolujeme proudový odběr, který by neměl překročit cca 50 mA,
- nyní osadíme stabilizátor IC<sub>5</sub> společně s kapacitami C<sub>6</sub> a C<sub>7</sub>, který slouží pro napájení analogové části mikropájk. Opět přivedeme napájecí napětí 24 V na vstup měniče IC<sub>1</sub> a zkontrolujeme výstupní napětí stabilizátoru IC<sub>5</sub>, kde bychom měli naměřit stabilní napětí o hodnotě 3,3 V.,
- jako další zaletujeme řídicí mikrokontrolér IC<sub>3</sub>, a to protože na DPS je místo a nepřekáží nám ostatní komponenty. Před samotným letováním nezapomeneme zkontrolovat orientaci MCU. Z mého pohledu se jeví jako nejlepší postup zafixování MCU na protilehlých koncích a následné zapájení stran, které jsme nefixovali. Zaletované piny zkontrolujeme pomocí „píp“ testu multimetru (nebo ohm metru), zda nedošlo ke spojení sousedních pinů. Případné nedokonalosti opravíme.,
- dále pokračujeme v osazování od nejmenších součástek až po ty největší,
- po kompletním osazení provedeme vizuální kontrolu a ověříme, zda jsou patřičné součástky na svém místě. Poté přistoupíme k nahrání řídicího programu.

### 6.3 Nahrání řídicího softwaru

Nahrání řídicího programu provedeme z operačního systému MS Windows. Potřebný software Atmel Studio 6.1 a vyšší je k dispozici zdarma na webu výrobce [2].

Po přeložení zdrojového kódu vznikne soubor \*.hex, který je nutné nahrát do programové FLASH paměti mikrokontroléru, kde bude vykonávat svou činnost.

U procesoru AVR řady Atmega probíhá nahrání programu po paralelní nebo ISP sběrnici, která má tu výhodu, že lze mikrokontrolér přeprogramovat přímo v dané aplikaci bez nutnosti odpojení. Protože byla použita SMD verze obvodu, který není možné nijak odpojit, byl zvolen tzv. ISP programátor. Konkrétně osvědčená konstrukce BiProg [45] pana Luboše Rückla v USB verzi 2.1 s firmwarem upraveným na VUT [44] pro použití s Atmel Studií 6 a vyšším. Postup nahrání řídicího softwaru z Atmel Studia 6.1:

- po nainstalování a spuštění Atmel Studia musíme nejprve přidat programátor. To provedeme v menu Tools => Add target. Zde vybereme náš programátor a stiskneme tlačítko Apply.,
- samotné nahrání programu provedeme v menu Tools => Device Programming, zde vybereme přidáný programátor, typ procesoru zvolíme ATmega328 a zvolíme Apply,
- v menu Fuses nastavíme pojistky MCU na hodnoty Extended = 0xFC, High = 0xD9 a Low = 0xFF,
- v záložce Memories a části Flash otevřeme z příloženého CD soubor BP\_uPajka.hex a zvolíme tlačítko Program,

- nyní by měla být mikropájka připravena k provozu, pokud se na LCD nic nezobrazí, zkusíme trimrem  $P_1$  změnit kontrast LCD displeje.

## 7 PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ MIKROKONTROLÉRU

Jak už bylo napsáno, software mikropájky byl vyvíjen v prostředí Atmel Studio 6.1 firmy Atmel [2].

### 7.1 Knihovna pro práci s LCD displejem

Displej je zapojen na 4bitovou sběrnici. Komunikaci zajišťuje knihovna `lcd.h` a `lcd.c` Petera Fleuryho [46], která je volně šiřitelná pod licencí GNU GPL.

Znaková sada je již součástí řadiče displeje. Ten většinou neobsahuje českou znakovou sadu, která by mohla scházet při dalším rozšiřování SW, jako je například menu. Tuto situaci lze řešit přidáním vlastního znaku jako v případě chybějícího stupně celsia „°“, který nebyl součástí znakové sady řadiče displeje a musel být vytvořen. Maximálně lze do paměti CGRAM displeje uložit 8 (0 - 7) uživatelských znaků. Pokud potřebujeme zahrnout například českou znakovou sadu, musíme vždy přepsat paměť CGRAM novým znakem a ten pak zobrazit na displeji.

Pro snadnější tvorbu znaků vytvořil pan Filip Zajíček grafické prostředí [47] spustitelné pod MS Windows. Výstup z programu LCDChar vypadá následovně:

```
0x06, 0x9, 0x09, 0x06, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00; znak 0 -> °
```

Tuto sekvenci znaků uložíme do pole v MCU a odešleme do paměti CGRAM displeje. Vykreslení znaku na LCD pak provedeme funkcí pro výpis znaku s patřičným indexem. Například pokud máme nadefinován pouze jeden znak, vykreslení provedeme příkazem `lcd_putc(0)`. Podrobněji lze výpis a zápis uživatelského znaku do CGRAM pochopit z příložených zdrojových kódů, které jsou součástí příloženého CD. Samotná implementace vlastního znaku je součástí souboru `BP_uPajka.c`.

### 7.2 Knihovna sériové komunikace (USART)

Knihovna `uart.h` a `uart.c` slouží pro komunikaci po vestavěném USARTu MCU a je opět převzatá od Petera Fleuryho [46]. Stejně jako knihovna pro práci s LCD je volně šiřitelná pod licencí GNU GPL.

Výhodou této knihovny je, že podporuje všechny mikrokontroléry rodiny AVR, které mají USART jako periférii. Tato knihovna byla využita v kombinaci s převodníkem USB => USART popsáním v kapitole „Komunikace s počítačem“ a slouží především pro ladění a debug programu.

## 7.3 Obsluha rotačního enkodéru s axiálním tlačítkem

Rotační enkodér společně s tlačítkem jsou vyhodnocovány v externím přerušení na sestupnou hranu signálu. Samotná implementace je v souboru BP\_uPajka.c.

Po příchodu sestupné hrany z výstupu enkodéru A se zkontroluje stav výstupu B, který určí, zda dojde k přičtení nebo odečtení žádané hodnoty teploty.

Sestupná hrana signálu z tlačítka způsobí vyvolání obslužné rutiny, která zajistí uložení aktuálně zobrazované žádané teploty do EEPROM MCU, následně je tato hodnota načítána po restartu zařízení či po přechodu z pohotovostního režimu do běžného provozu.

## 7.4 Čítače / Časovače

Vybraný mikrokontrolér obsahuje celkem tři čítače/časovače, jejich detailní využití je nastíněno dále. Obslužné rutiny všech čítačů/časovačů lze nalézt v souboru BP\_uPajka.c.

### 7.4.1 Čítač / Časovač 0

Je nastaven jako časovač, jehož přerušení je nastaveno na 488  $\mu$ s, což odpovídá cca rezonančnímu kmitočtu  $f_{\text{REZ}} = 2048$  Hz zvolené piezosíreňy. Dále tento časovač zajišťuje překreslení LCD displeje každých cca 200 ms. K samotnému překreslení dochází v hlavní smyčce programu.

### 7.4.2 Čítač / Časovač 1

Časovač 1 je využit pro generování PWM signálu o frekvenci 62,5 kHz, který slouží ke spínání výkonového prvku. O výpočet střídy generovaného PWM signálu se stará funkce *regulator*, který je typu on/off, doplněný o proměnné zesílení. Samotný regulátor je volán z hlavní smyčky programu.

Regulátor je navržený tak, aby překročil žádanou teplotu o 1,5 °C a znovu se aktivoval až při poklesu o 1,5 °C od žádané teploty. Při dosažení odchylky 10 °C se spustí počítadlo, které určuje čas, kdy dojde k překročení teploty. Pokud je čas delší, zvýší se zesílení regulátoru. Další počítadlo se spouští v okamžiku překročení požadované teploty. Opět pokud je čas setrvání nad potřebnou hodnotou delší než zvolená konstanta, dojde ke snížení zesílení regulátoru. Tím je zajištěno udržení žádané teploty ve střední hodnotě.

Původní řešení zahrnovalo měření doby poklesu o stanovenou hodnotu teploty, ale časová konstanta se při pájení velkých i malých ploch lišila v rámci šumu operačního zesilovače, proto bylo od této metody upuštěno.

### 7.4.3 Čítač / Časovač 2

Je využit jako časovač s přetečením každých 10 ms a slouží pro sběr dat z termočláňkového zesilovače, ke kterému dochází každých 100 ms a také zajišťuje hlídání odložení pájecího pera ve stojánku. To je založeno na mikrosplnači, kdy po

vložení pájecího pera do stojánku dojde k sepnutí spínače a startu měření doby odložení. Pokud je pájecí pero odloženo po stanovenou dobu, přejde mikropájka do pohotovostního režimu, kdy udržuje teplotu na 200 °C. Po vyjmutí pera ze stojánku se načte uložená teplota z EEPROM a mikropájka přechází do běžného provozu. Pokud je pájecí pero odloženo kratší dobu, než je nastavena hranice, dojde k resetu počítadla a jeho opětovnému startu opět až po vložení pájecího pera do stojánku.

## **7.5 Hlavní smyčka**

Na začátku hlavní smyčky se provede inicializace binárních vstupů/výstupů, nastavení čítačů/časovačů, počáteční inicializace proměnných, načtení uložené teploty z EEPROM a nastavení sériové komunikace. Poté se program zacyklí v nekonečné smyčce, kde se vyhodnocují údaje o změřené (skutečné) teplotě, předané hodnoty od tlačítka rotačního enkodéru a od odloženého pájecího pera a dochází zde k překreslení LCD displeje. Obrazovky, které budou zobrazovány, jsou určeny na základě stavů tlačítek a mezních stavů (odpojené pero či odložené pero). Součástí hlavní smyčky je tedy také vyhodnocení mezních stavů, kdy dojde k odpojení pájecího pera a dochází zde k aktivaci zvukové signalizace.

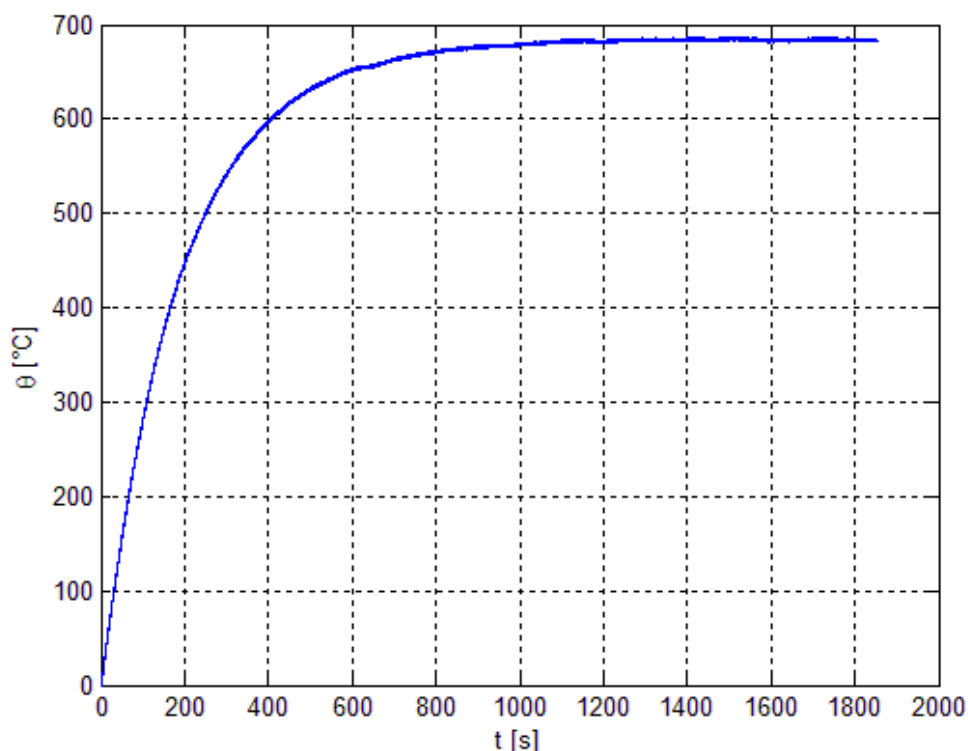
## 8 IDENTIFIKACE SOUSTAVY PÁJECÍHO PERA (SOLOMON)

Cílem identifikace soustavy systému je získat matematický popis chování systému. Existují určité postupy jak navrhnout řízení bez znalosti chování systému, ale ty se používají v případech, kdy není možné sestavit model nebo je ho obtížné získat [37].

Pájecí pero je soustavou, kde je jednoduché provést jednotkový skok vstupní veličiny, proto by bylo možné pro identifikaci soustavy pájecího pera použít metodu analýzy odezvy na jednotkový skok. Vzhledem k situaci, kdy dochází k prudké změně soustavy pájecího pera po přiložení hrotu k pájecímu bodu, bylo by nutné použít adaptivní regulátor či více regulátorů a přepínat mezi nimi podle zvolených kritérií. Ovšem matematický popis systému založeného na zpětnovazebním snímání teploty je velice obtížný či nereálný. To bylo důvodem k použití on/off regulátoru.

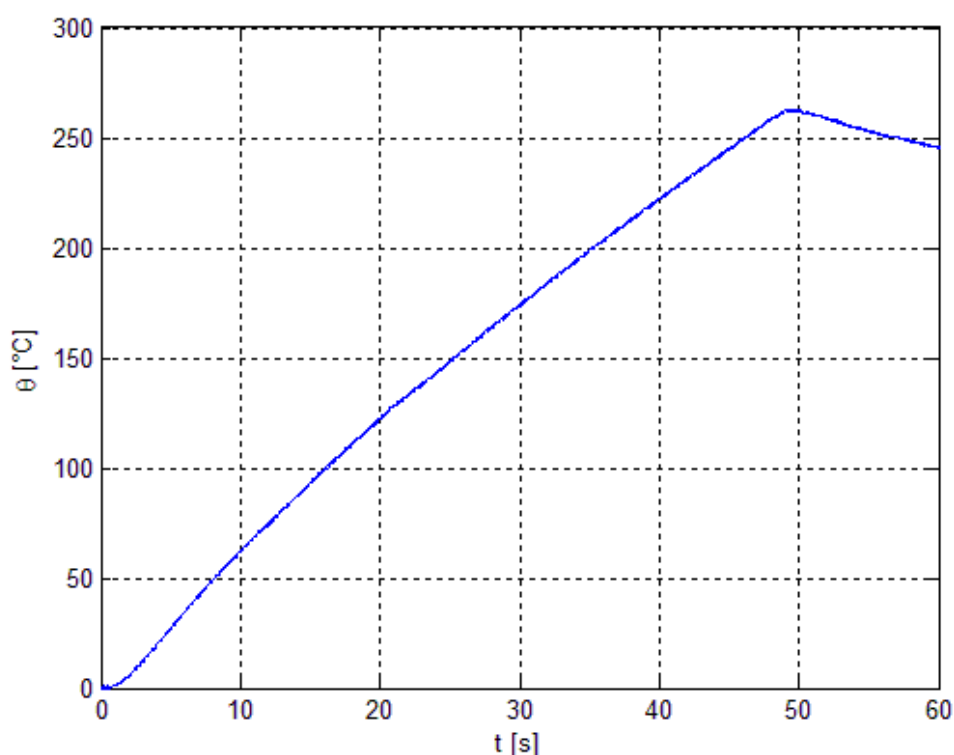
Přechodová charakteristika pájecího pera byla přesto změřena z důvodu optimalizace vzorkovací frekvence a určení řádu systému. Hledanou charakteristiku získáme tak, že na vstup soustavy (pájecí pero) pustíme maximální možný výkon, čímž zajistíme jednotkový skok a budeme sledovat výstupní napěťový signál převedený na teplotu hrotu. Protože nelze teplotu z důvodu mechanického zničení pájecího pera zvyšovat nad cca 450 °C, je nutné snížit vstupní signál a následně charakteristiku přepočítat, aby odpovídala situaci, kdy na vstupu působí signál o jednotkovém skoku.

V tomto okamžiku není známá vzorkovací frekvence, ale obvykle jsou tepelné děje „pomalé“, proto zvolíme vzorkovací frekvenci  $f_{vz} = 100$  Hz.



Obrázek 8.1: Odezva na snížený jednotkový skok pájecího pera Solomon (odečtena teplota okolí)

Přesnější odhad vzorkovací frekvence byl proveden tak, že jsme vytopili pájecí pero na teploty (250 °C, 280 °C a 300 °C) a měřili dobu poklesu o 3 °C. Polovina získané časové konstanty je pak hledaná vzorkovací frekvence. V našem případě byla průměrná doba poklesu  $t_{\text{POKLES}} = 0,5$  s, což odpovídá vzorkovací frekvenci  $f_{\text{vz}} = 2$  Hz. Ovšem při praktických testech se ukázalo, že je příliš nízká. Zejména v situaci, kdy byla požadovaná teplota nastavena například na 300 °C a vzorek přišel v době, kdy byla skutečná hodnota teploty 299 °C. Tím pádem další vzorek následoval za 0,5 s, tedy skutečná teplota by měla mít hodnotu cca 302 °C, ovšem v reálu bylo převýšení 12 °C. Proto byla vzorkovací frekvence experimentálně doladěna na výslednou hodnotu  $f_{\text{vz}} = 10$  Hz, pomocí které bylo dosaženo optimálních výsledků.



Obrázek 8.2: Příklad určení vzorkovací frekvence pro 280 °C (odečtena teplota okolí)

## 9 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

Bohužel se z konstrukčních důvodů nepodařilo připojení dvou vodičových per, proto byla navržená mikropájka testována s pájecím perem Solomon. Podrobněji se tomuto problému věnuje kapitola „Problémy a možná vylepšení“.

Ověření funkčnosti mikropájky bylo provedeno při praktickém letování. Dosažené výsledky jsou patrné ze zaletovaného plošného spoje (Obrázek 9.1 a Tabulka 9.1), která shrnuje základní elektrické parametry. Test prokázal, že navržené řešení mikropájky je schopné udržet téměř konstantní teplotu i při letování větších plošek na DPS.

Dále bylo provedeno srovnání s pájecí stanicí ERS50 [4]. Test ukázal, že obě zařízení se při pájení i udržování konstantní teploty hrotu chovaly téměř identicky, což je způsobeno podobnou kvalitou pájecích per.

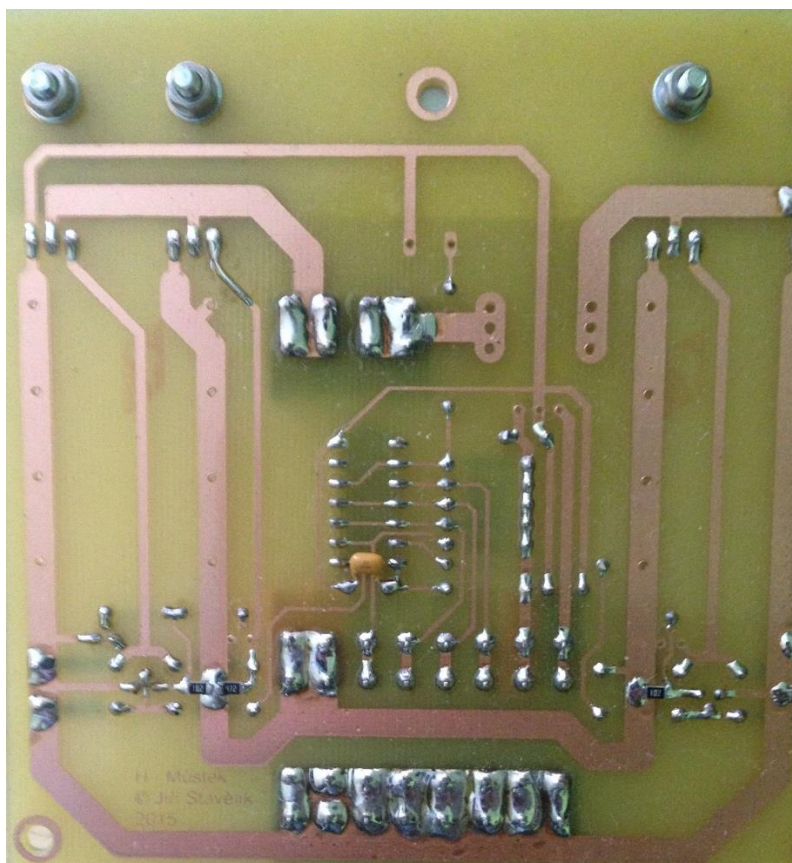
Mnou navržené řešení je ovšem doplněno o rozšiřující funkce společně s vizualizací skutečné a žádané teploty, což uživateli umožňuje poměrně přesné nastavení, které je u moderních bezolovnatých pájek poměrně kritické.

Cenově stanice ERS50 vychází okolo 1700 CZK. Oproti tomu se nastíněné řešení pohybuje v rozmezí 2000 - 2500 CZK. Kalkulace zahrnuje kompletní stanici při stavbě jednoho kusu (součástky, krabička, DPS, pájecí pero Solomon, průmyslový měnič, odkládací stojánek). V menší sérii 20 ks by se cena jistě dostala na podobnou cenu jako v případě stanice ERS50. Po zahrnutí úprav, kterými se zabývá kapitola „Problémy a možná vylepšení“, by se stanice mohla stát zajímavým konkurentem na poli lepších pájecích stanic.

Tabulka 9.1: Parametry navržené mikropájky

|                                                                           |           |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Minimální napájecí napětí [V]</b>                                      | 7         |
| <b>Maximální napájecí napětí [V]</b>                                      | 28        |
| <b>Doporučené napájecí napětí [V]</b>                                     | 24        |
| <b>Proudový odběr při doporučeném napájecím napětí (vytápí) [A]</b>       | 1,96      |
| <b>Proudový odběr při doporučeném napájecím napětí (běžný provoz) [A]</b> | 1         |
| <b>Proudový odběr při doporučeném napájecím napětí (netopí) [mA]</b>      | 20        |
| <b>Proudový odběr v pohotovostním režimu [A]</b>                          | 0,76      |
| <b>Rozmezí regulace teploty [°C]</b>                                      | 200 - 400 |
| <b>Odchylka od požadované teploty [°C]</b>                                | ±5        |

K nynější verzi řídicí desky mikropájky lze připojit jakékoli pájecí pero vybavené termočlánkem typu K ve čtyřvodičovém zapojení.



Obrázek 9.1: Zaletovaná DPS pomocí realizované mikropájky

## 10 PROBLÉMY A MOŽNÁ VYLEPŠENÍ

Vzhledem k diferenciálnímu zapojení snímače teploty hrotu mikropáčky není možné připojit dvouvodičová pera. Toto zapojení bylo zvoleno z důvodu přesnosti, kdy není slabý signál termočlánku ovlivňován odporem přívodního vedení k pájecímu peru. Ovšem pokud je snímač teploty pájecího pera zapojen diferenciálně a pájecím perem se dotkneme pájecího bodu, začne teplota nabývat nekontrolovatelných hodnot.

Řešením je spojení pájecího hrotu se zemí a v případě požadavku na vyšší přesnost měření kompenzovat odpor vedení k hrotu.

Dále by šlo snížit spínací frekvenci MOSFETu, např. na 50 Hz, s následným vypuštěním step-down měniče. Při spínání na takto nízké frekvenci by bylo možné omezit střidu PWM na maximum 80 % tak, aby mohl být stále dodán nejvyšší možný výkon do pájecího pera. V získané časové prodlevě, kdy je vypnuté vyhřívání, by pak bylo možné snímat napětí z termočlánku. V tomto časovém intervalu bez problému stihne AD převod i malý mikrokontrolér, jakým je například zvolená Atmega328. Původní řešení zahrnovalo vypnutí spínacího prvku po dobu měření. Ovšem nebylo počítáno se situací, kdy se na původní spínací frekvenci namoduluje parazitní spínací frekvence o kmitočtu vzorkovací frekvence.

Další možné vylepšení by mohlo zahrnovat softwarové rozšíření o menu, kde by bylo možné nastavovat dobu, za jakou přejde mikropáčka do pohotovostního režimu, vypnutí pohotovostního režimu, krok zvyšování teploty, ukládání průměrné hodnoty teploty s následným odesláním dat do PC, přidání bezdrátové komunikace ve formě bluetooth atd.

Stávající řešení by pak bylo možné vylepšit použitím kvalitnějšího čtyřvodičového pera, které lépe splňuje požadavky nastíněné v kapitole „Řízení mikropáčky“.

## 11 ZÁVĚR

Předložená bakalářská práce se zabývá volbou koncepce a návrhem obvodového řešení mikropájky, dále softwarovou implementací umožňující udržování nastavené konstantní teploty hrotu. Navržené řešení umožňuje zadávat teplotu hrotu pomocí rotačního enkodéru a skutečnou teplotu zobrazovat na LCD displeji. Dále zařízení detekuje odpojení pájecího hrotu, akusticky signalizuje vyhřátí na požadovanou hodnotu, dovoluje uložit žádanou teplotu do EEPROM paměti MCU a následně ji po zapnutí napájení načíst.

Jako základ číslicového řídicího systému byl zvolen mikrokontrolér Atmega328 firmy Atmel. V rámci práce bylo navrženo schéma zapojení, stanoveny hodnoty a typy jednotlivých součástek. Byl vytvořen plošný spoj, který byl osazen, oživen a následně testován. Pro realizaci jsem zvolil kvalitní dvou vodičové pájecí pero JBC T245A s vestavěným termočlánekem přímo v hrotu a levnější čtyřvodičové pájecí pero Solomon SL20/30L.

Z důvodu diferenciálního měření termočlánekového napětí, které bylo použito k eliminaci přírodního vodiče k pájecímu hrotu, nebylo možné snímat teplotu u dvou vodičových typů pájecích per. Dotyk pájecího pera s pájecí plochou znemožní jakékoli snímání napětí z termočlánu. Řešením tohoto problému se věnuje kapitola „Problémy a možná vylepšení“.

Dosažené výsledky pak shrnuje kapitola „Dosažené výsledky“, které řadí navrženou mikropájku zhruba do cenové hladiny (1500 – 3000) CZK komerčně vyráběných produktů.

Na základě získaných zkušeností jsem se rozhodl pracovat na nové verzi pájecí stanice, která bude zahrnovat vylepšení popsaná v kapitole „Problémy a možná vylepšení“.

Součástí práce je také náznak mechanického uspořádání.

# SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

|                  |                                                                       |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| PC               | osobní počítač                                                        |
| LCD              | displej z tekutých krystalů                                           |
| OLED             | displej využívající organických elektroluminiscenčních diod           |
| AVR              | rodina mikrokontrolérů firmy Atmel                                    |
| MCU              | mikrokontrolér                                                        |
| DPS              | deska plošných spojů                                                  |
| FLASH            | nevolatilní elektricky programovatelná paměť                          |
| SRAM             | rychlá synchronní volatilní paměť                                     |
| EEPROM           | elektricky mazatelná a programovatelná paměť                          |
| JTAG             | testovací a programovací rozhraní                                     |
| SMD              | surface mount device, součástky pro povrchovou montáž                 |
| SMT              | surface mount technology, technologie součástek pro povrchovou montáž |
| THT              | through-hole technology, technologie součástek s vývody               |
| PWM              | pulzně šířková modulace                                               |
| A/D              | analogově digitální převodník                                         |
| DC               | stejnosměrné napětí                                                   |
| AC               | střídavé napětí                                                       |
| USART            | synchronní/asynchronní sériové rozhraní                               |
| USB              | univerzální sériová sběrnice                                          |
| SPI              | seriál peripheral interface                                           |
| I <sup>2</sup> C | multi-masterová počítačová sériová sběrnice                           |
| U <sub>REF</sub> | referenční napětí                                                     |
| U <sub>CC</sub>  | stejnosměrné napájecí napětí                                          |
| ISP              | in system programming, programovací rozhraní bez nutnosti odpojení    |
| ON               | zapnuto                                                               |
| OFF              | vypnuto                                                               |
| f <sub>vz</sub>  | vzorkovací frekvence                                                  |
| LDO              | lineární stabilizátor                                                 |
| RS232            | standard sériové komunikace                                           |
| GNU GPL          | general public licence                                                |
| ESD              | součástky citlivé na elektrostatický výboj                            |
| SW               | software                                                              |
| CGRAM            | display data RAM, paměť znaků                                         |

# LITERATURA

- [1] ATmega328. *Atmel* [online]. [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)
- [2] Atmel Corporation. *Atmel* [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.atmel.com>
- [3] Microchip Corporation. *Microchip* [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.microchip.com>
- [4] ERS50. *Segat* [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: <http://www.sagat.info/?q=node/25>
- [5] ADP3623 MOSFET Driver. *Analog Devices* [online]. [cit. 2014-10-12]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/ADP3623\\_3624\\_3625\\_3633\\_3634\\_3635.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADP3623_3624_3625_3633_3634_3635.pdf)
- [6] MOSFET IRLZ44N. *International Rectifier* [online]. [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: [http://www.redrok.com/MOSFET\\_IRLZ44N\\_55V\\_47A\\_22mO\\_Vth2.5.pdf](http://www.redrok.com/MOSFET_IRLZ44N_55V_47A_22mO_Vth2.5.pdf)
- [7] Grayův kód. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Gray%C5%AFv\\_k%C3%B3d](http://cs.wikipedia.org/wiki/Gray%C5%AFv_k%C3%B3d)
- [8] LCD Display. *Winstar* [online]. [cit. 2014-11-02]. Dostupné z: [http://www.parsicitalia.it/files/WH0802A1-Parsic-Italia\\_7b6kg3o8.pdf](http://www.parsicitalia.it/files/WH0802A1-Parsic-Italia_7b6kg3o8.pdf)
- [9] Hitachi HD44780 LCD controller. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Hitachi\\_HD44780\\_LCD\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/Hitachi_HD44780_LCD_controller)
- [10] SC-12100 Instrument Cases. *Bud Industries* [online]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/55/hb12100-49641.pdf>
- [11] Sitronix Driver ST7066. *Sitronix* [online]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/LCD/st7066.pdf>
- [12] Voltage Reference LM4040. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4040-n.pdf>
- [13] USB/USART Interface. *FTDI* [online]. [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: [http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)
- [14] Electronic Component Shop. *EZK* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://www.ezk.cz>
- [15] Electronic Component Shop. *GME* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://www.gme.cz>
- [16] Electronic Component Shop. *Farnell* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com>
- [17] Electronic Component Shop. *Mouser* [online]. [cit. 2014-11-09]. Dostupné z: <http://cz.mouser.com/?gclid=CNivvrOP7sECFanMtAodBSMAow>
- [18] Thermocouple Amplifier AD8495. *Analog Devices* [online]. [cit. 2014-11-12]. Dostupné z: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD8494\\_8495\\_8496\\_8497.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8494_8495_8496_8497.pdf)

- [19] MCP1415 MOSFET Driver. *Microchip* [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22092E.pdf>
- [20] MAX232 Signal Convertor. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/256/MAX220-MAX249-67423.pdf>
- [21] MAX232 Signal Convertor. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/256/MAX3222-MAX3241-103207.pdf>
- [22] Rotary Encoder. *Alps* [online]. [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1685514.pdf>
- [23] Step-Down Voltage Regulator LM2574. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2574.pdf>
- [24] JBC Soldering Tools. *JBC* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: <http://www.jbctools.com>
- [25] JBC - T245A Soldering Handle. *JBC* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: [http://www.jbctools.com/pdf/T210-T245\\_MANUAL.pdf](http://www.jbctools.com/pdf/T210-T245_MANUAL.pdf)
- [26] Hakko and Solomon Soldering Iron Driver. *Dangerous Prototypes Forum* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://dangerousprototypes.com/forum/viewtopic.php?f=56&t=2457>
- [27] Universal Electromagnetic Speaker. *Acoustic Dynamics LTD* [online]. [cit. 2014-12-04]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/641/067/al1210mte-p5r-datasheet-1.pdf>
- [28] Industrial Switching Converter. *Carspa* [online]. [cit. 2014-12-10]. Dostupné z: <http://www.hadex.cz/spec/g582.pdf>
- [29] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2011, 564 s. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [30] Ferrite Cores. *Ferroxcube*. [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/8fa9fdb925a20738c733e5afcf8d5b44/e25137.pdf>
- [31] Electronic Component Shop. *TME* [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.tme.eu>
- [32] Low-Dropout Positive Fixed and Adjustable Voltage Regulators NCP1117. *ON Semiconductor* [online]. [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/NCP1117-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1117-D.PDF)
- [33] Proudová zatížitelnost vodiče. In: *PragoBoard*. [online]. [cit. 2015-02-08]. Dostupné z: [http://www.pragoboard.cz/proudova\\_zatizitelnost](http://www.pragoboard.cz/proudova_zatizitelnost)
- [34] Základní problémy při pájení s bezolovnatými pájkami. In: *SMT Centrum* [online]. 2013 [cit. 2015-05-02]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyber-pajeci-techniky/vhodne-pokoveni-pajecich-hrotu-pro-bezolovnate-pajeni/>
- [35] Termočlánek. In: *Wikipedia: The free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Termo%C4%8Dl%C3%A1nek>
- [36] Mikropájka 2011. In: JANÍK, Pavel. *PaJa - trb* [online]. 2013 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: [http://paja-trb.cz/konstrukce/mikropajka\\_2011.html](http://paja-trb.cz/konstrukce/mikropajka_2011.html)
- [37] Blaha, P., Vavřín, P.: *Řízení a regulace I. Základy regulace lineárních systémů - spojitě a diskrétní*. Elektronické skriptum VUT.
- [38] Pájení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/P%C3%A1jen%C3%AD>

- [39] DIN konektory. In: *WiFiMorava* [online]. 2005 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://internet.vprdeli.com/view.php?cislocclanku=2005101703>
- [40] *Řídicí obvody (budiče) MOSFET a IGBT* [online]. V Ostravě, 2013 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.fei1.vsb.cz/kat430/data/vsp/budice.pdf>. Přednáška. Vysoká škola báňská.
- [41] Princip - Encoder. In: *Pohonná technika* [online]. 2007 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/encodery>
- [42] ĎAĎO, S. - KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. V Praze: ČVUT, 1996. 315 s. ISBN 80-01-01500-9.
- [43] Použití rotačních enkodérů. In: MAŠLÁŇ, S. *Elektronika, bastlení, návody* [online]. 2007 [cit. 2015-03-22]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/tutorial/RotaryEncoder/RotaryEncoder.html>
- [44] Všem studentům UREL: Konstrukce programátoru procesorů AVR. *Ústav radioelektroniky* [online]. V Brně, 2013 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/index.php?page=study\\_all](http://www.urel.feec.vutbr.cz/index.php?page=study_all)
- [45] Biprog - nejen ISP programátor. In: RŮCKL, Luboš. *Luboš Rückl - Blog* [online]. 2008 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://web.quick.cz/ruckl/biprog/biprog.html>
- [46] AVR-GCC Libraries. In: FLEURY, Peter. *AVR-Software* [online]. 2006 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html>
- [47] Popis programu LCD\_Char. In: ZAJÍČEK, Filip. *Osobní stránky Filipa Zajíčka* [online]. 2013 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/filip.zajicek/x51/LCDChar/LCDChar.html>
- [48] Usměřňovač. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Usm%C4%9Br%C5%88ova%C4%8D>

# PŘÍLOHA

## A Rozpis součástek

Tabulka 11.1: Rozpis součástek - Řídící deska

| Označení                                              | Hodnota | Typ          | Pouzdro       | Počet | Poznámka                          |
|-------------------------------------------------------|---------|--------------|---------------|-------|-----------------------------------|
| C1, C3                                                | 470 uF  |              | Rozteč 5 mm   | 2x    | Kondenzátor - elektrolytický      |
| C2, C4, C6, C7, C9, C13, C14, C15, C16, C19, C23, C24 | 100 nF  |              | SMD_0805      | 12x   | Kondenzátor - keramický           |
| C5, C8, C10-C12                                       | 10 uF   |              | SMD_B         | 5x    | Kondenzátor - elektrolytický      |
| C17, C18                                              | 22 pF   |              | SMD_0805      | 2x    | Kondenzátor - keramický           |
| C20, C22                                              | 10 nF   |              | SMD_0805      | 2x    | Kondenzátor - keramický           |
| C21                                                   | 1 uF    |              | SMD_0805      | 1x    | Kondenzátor - keramický           |
| C27                                                   | 1 uF    |              | Rozteč 5 mm   | 1x    | Kondenzátor - foliový (TEXT)      |
| C25, C26                                              | 22 uF   |              | Rozteč 2,5 mm | 2x    | Kondenzátor - elektrolytický      |
| C28-C31                                               | 22 nF   |              | SMD_0805      | 4x    | Kondenzátor - keramický           |
| R1                                                    | 22 k    |              | SMD_0805      | 1x    | Rezistor                          |
| R2                                                    | 3k3     |              | SMD_0805      | 1x    | Rezistor                          |
| R3, R6, R15, R16, R17, R22                            | 4k7     |              | SMD_0805      | 6x    | Rezistor                          |
| R4, R11                                               | 51 k    |              | SMD_0805      | 2x    | Rezistor                          |
| R5                                                    | 0R0     |              | SMD_0805      | 1x    | Rezistor (TEXT)                   |
| R8, R9                                                | 100R    |              | SMD_0805      | 2x    | Rezistor                          |
| R7                                                    | 1k5     |              | SMD_0805      | 1x    | Rezistor                          |
| R10                                                   | 1 M     |              | SMD_0805      | 1x    | Rezistor                          |
| R12-R14                                               | 82 R    |              | SMD_0805      | 3x    | Rezistor                          |
| R18-R21                                               | 10 k    |              | SMD_0805      | 4x    | Rezistor                          |
| P1                                                    | 10 k    |              | PT6V          | 1x    | Mini trimr - ležatý               |
| D1, D3                                                |         | LED/G        | SMD_1206      | 2x    | LED dioda - zelená                |
| D2                                                    |         | ES2D         | SMD_SMA       | 1x    | Schottkyho dioda                  |
| D4, D5, D6                                            |         | 1N4148       | SMD_SOD80     | 3x    | Univerzální dioda                 |
| D7                                                    |         | ES3D         | SMD_SMC       | 1x    | Schottkyho dioda                  |
| IC1                                                   |         | LM2575T-5V   | SO14W         | 1x    | Snížující měnič napětí            |
| IC2                                                   |         | LM4040       | SOT-23        | 1x    | Napěťová reference - 2,048 V      |
| IC3                                                   |         | Atmega328    | TQFP32        | 1x    | Mikrokontrolér                    |
| IC4                                                   |         | AD8495       | MSOP8         | 1x    | Zesilovač termočlánekového napětí |
| IC5                                                   |         | NCP1117-3V3  | SOT-223       | 1x    | Lineární stabilizátor napětí      |
| IC6                                                   |         | 40106D       | SO14          | 1x    | 6x Schmittův klopný obvod         |
| IC7                                                   |         | MCP1416      | SOT-23-5      | 1x    | Budič MOSFET tranzistoru          |
| K1, K2, K3                                            |         | ARK500/2     | Rozteč 5 mm   | 3x    | Svorkovnice                       |
| K4                                                    |         | MLW06        |               | 1x    | Vidlice do DPS - 6 pinů           |
| K5                                                    |         | PSH02-04P    |               | 1x    | Konektory se zámkem               |
| K6                                                    |         | PSH02-02P    |               | 1x    | Konektory se zámkem               |
| L1                                                    | 330 uH  | DE1207       |               | 1x    | Induktor                          |
| L2                                                    | 10 uH   | TL. 10uH     | SMD_1206      | 1x    | Induktor                          |
| L3                                                    | 234 uH  |              |               | 1x    | Induktor - (TEXT)                 |
| Q1                                                    | 16 MHz  |              | HC-49U        | 1x    | Krystal                           |
| S1                                                    |         | TM070        |               | 1x    | Tlačítko                          |
| REP1                                                  |         | AL1210MTE    | Ø 12 mm       | 1x    | Piezo                             |
| T1                                                    |         | BC817        | SOT-23        | 1x    | Tranzistor - Unipolární           |
| T2                                                    |         | IRLZ44NPBF   | TO-220        | 1x    | Tranzistor - Bipolární            |
| F1                                                    |         | RXE050       | Rozteč 5 mm   | 1x    | Pojistka do DPS 500 mA            |
| LCD1                                                  |         | WH0802A1     |               | 1x    | LCD s řadičem - 2 ř x 8 s         |
| ENC1                                                  |         | EC12E2424407 |               | 1x    | Enkodér s axiálním tlačítkem      |

Tabulka 1.2: Rozpis součástek - Řídící deska (ostatní materiál)

| Označení | Hodnota           | Typ           | Pouzdro | Počet | Poznámka                                   |
|----------|-------------------|---------------|---------|-------|--------------------------------------------|
| Krabička |                   | SC-12100      |         | 1x    | Montážní krabička                          |
| Měnič    |                   | HS-60/24V     |         | 1x    | 24 V / 60 W                                |
| K5*      |                   | PFH02-04      |         | 1x    | Zásuvky se zámkem                          |
| K6*      |                   | PFH02-02      |         | 1x    | Zásuvky se zámkem                          |
| K5*, K6* |                   | PFF02-01F     |         | 6x    | Piny pro konektory PFH02                   |
| LCD1*    |                   | BL916G        |         | 1x    | Propojení displeje - Zásuvka dvouřadá      |
| LCD1*    |                   | S2G20         |         | 1x    | Propojení displeje - Lámací lišta dvouřadá |
| L3*      |                   | E25/13/7-3C90 | E       | 2x    | Feritové jádro                             |
| L3*      |                   | WE-2752V      |         | 1x    | Kostříčka tlumivky                         |
| L3*      |                   | CLI-EFD25     |         | 2x    | Montážní upevňovací klips                  |
| L3*      | 1 mm <sup>2</sup> |               |         | 2m    | Drát smaltovaný - Měděný                   |

Tabulka 1.3: Rozpis součástek - Převodník úrovní

| Označení   | Hodnota | Typ       | Pouzdro  | Počet | Poznámka                |
|------------|---------|-----------|----------|-------|-------------------------|
| C1, C2     | 100 nF  |           | SMD_0805 | 2x    | Kondenzátor - keramický |
| IC1        |         | FT232RL   |          | 1x    | Převodník úrovní        |
| R1, R2     | 1 k     |           | SMD_805  | 2x    | Rezistor                |
| LED1, LED2 |         | LED/G     | SMD_0805 | 1x    | LED dioda - zelená      |
| X1         |         | USB-VAP90 | typ A    | 1x    | USB konektor A do DPS   |
| JP2        |         | PSH02-04P |          | 1x    | Konektory se zámkem     |

Tabulka 1.4: Rozpis součástek - Převodník úrovní (ostatní materiál)

| Označení | Hodnota | Typ       | Pouzdro | Počet | Poznámka                 |
|----------|---------|-----------|---------|-------|--------------------------|
| JP2*     |         | PFH02-04  |         | 1x    | Konektory se zámkem      |
| JP2*     |         | PFF02-01F |         | 4x    | Piny pro konektory PFH02 |

Součástí označené (\*) patří k sobě. Uvedený materiál lze zakoupit v prodejnách EZK [14], GME [15] a TME [31], speciální součástky pak ve Farnell [16], či Mouser [17].

## B Naměřené hodnoty závislosti napětí termočlánu na teplotě

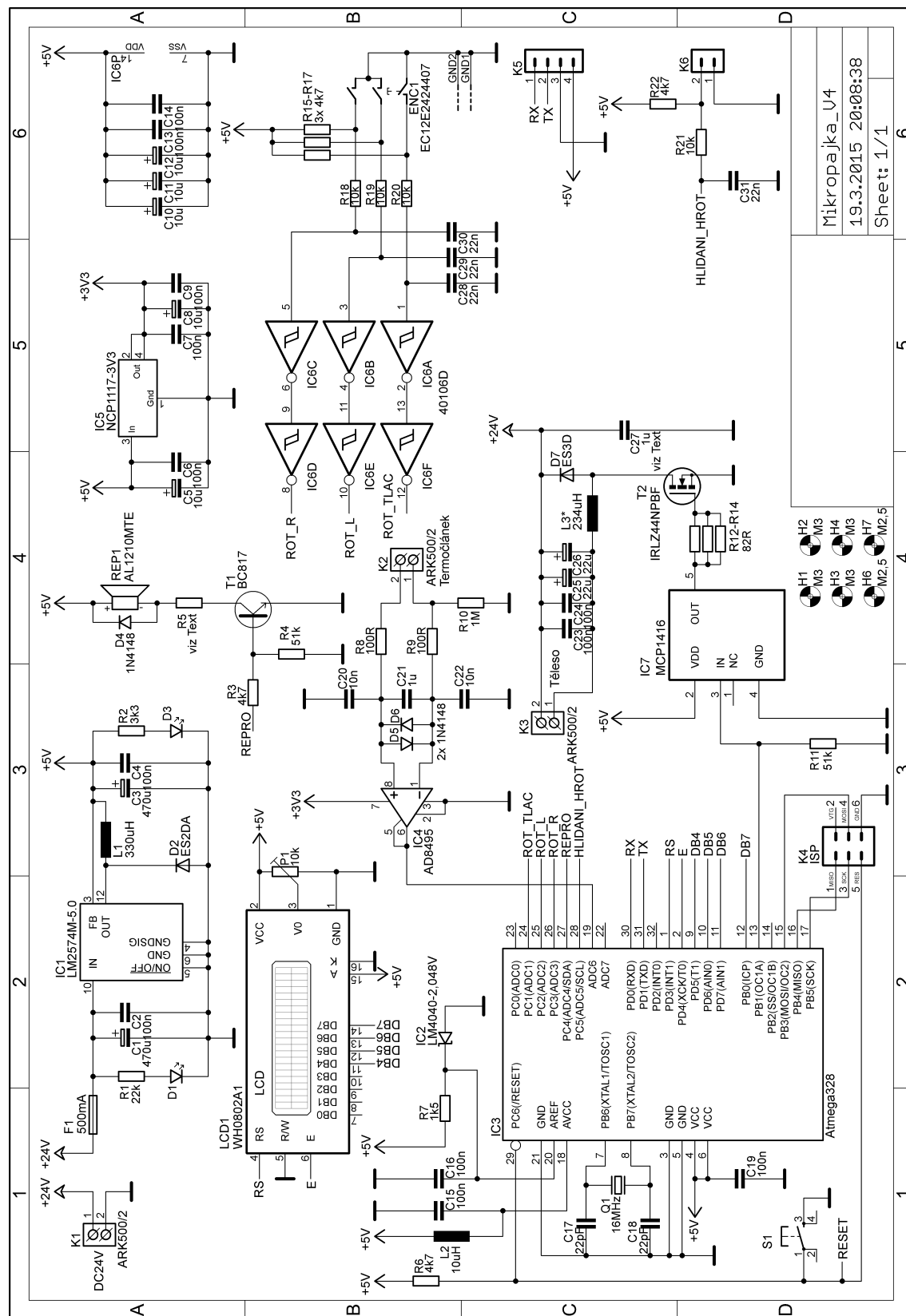
Tabulka 1.5: Závislost napětí termočlánu pájecího pera JBC T245A na teplotě hrotu

| $\vartheta$ [°C] | $U_{\text{TERMOČLÁNEK}}$ [mV] |
|------------------|-------------------------------|
| 70               | 1,8                           |
| 80               | 2,0                           |
| 90               | 2,4                           |
| 100              | 2,9                           |
| 110              | 3,3                           |
| 120              | 3,7                           |
| 130              | 3,9                           |
| 140              | 4,5                           |
| 150              | 4,5                           |
| 160              | 5,4                           |
| 170              | 5,8                           |
| 180              | 6,1                           |
| 190              | 6,5                           |
| 200              | 7,0                           |
| 210              | 7,2                           |
| 220              | 7,5                           |
| 230              | 8,0                           |
| 240              | 8,6                           |
| 250              | 8,8                           |
| 260              | 9,5                           |
| 270              | 9,7                           |
| 280              | 9,9                           |
| 290              | 10,8                          |
| 300              | 11,3                          |

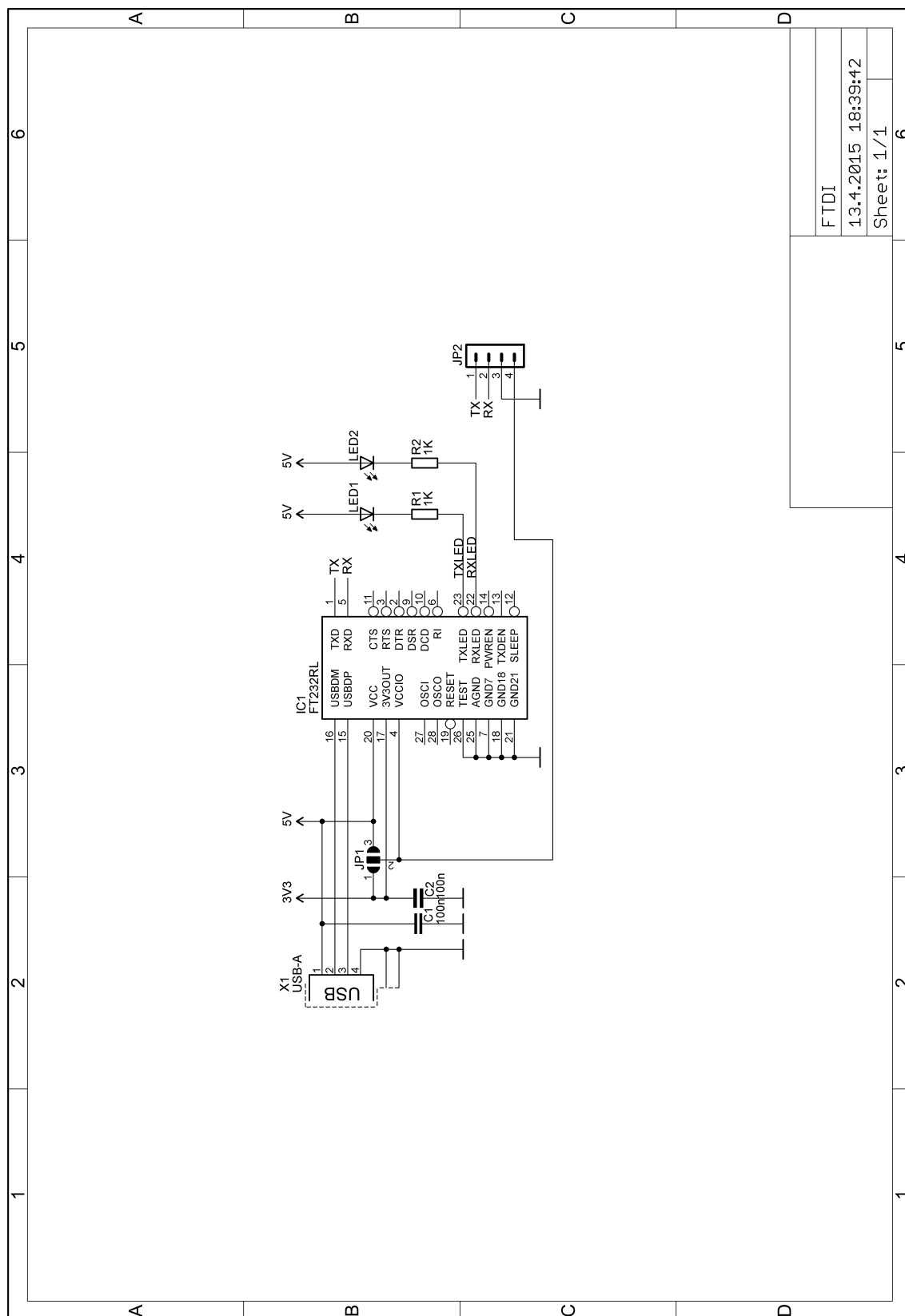
Tabulka 1.6: Závislost napětí termočláneků pájecího pera Solomon SL 20/30I na teplotě hrotu

| $\vartheta$ [°C] | $U_{\text{TERMOČLÁNEK}}$ [mV] |
|------------------|-------------------------------|
| 65               | 1,4                           |
| 82               | 2,0                           |
| 95               | 2,5                           |
| 110              | 3,1                           |
| 126              | 3,7                           |
| 140              | 4,2                           |
| 155              | 4,8                           |
| 170              | 5,3                           |
| 185              | 5,9                           |
| 198              | 6,5                           |
| 220              | 7,2                           |
| 230              | 7,8                           |
| 240              | 8,4                           |
| 255              | 9,2                           |
| 273              | 9,8                           |
| 290              | 10,6                          |
| 300              | 10,8                          |

## C Výsledná schémata zapojení



Obrázek 1.1: Výsledné schéma zapojení řídicí desky

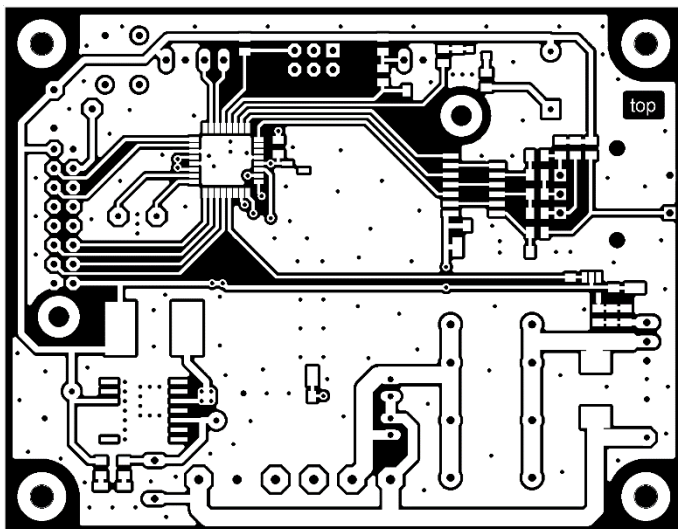


Obrázek 1.2: Výsledné schéma zapojení převodníku úrovní

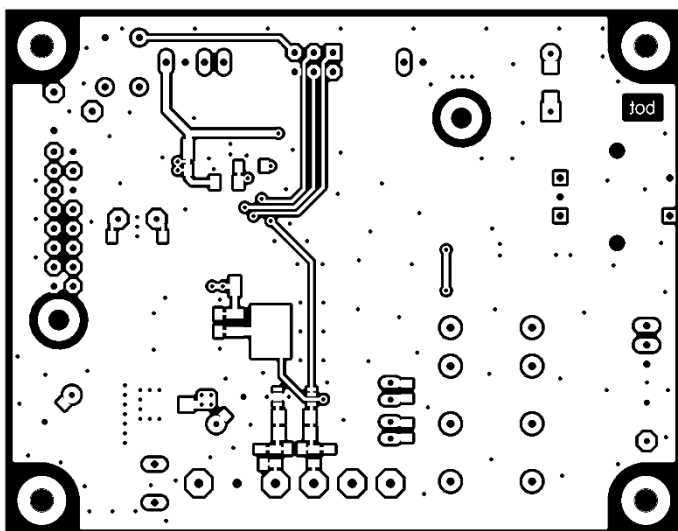
## D Plošný spoj

### D.1 Motiv plošného spoje řídicí desky

Rozměry plošného spoje činí (70 x 90) mm, rozlišení 600 dpi, M 1:1.

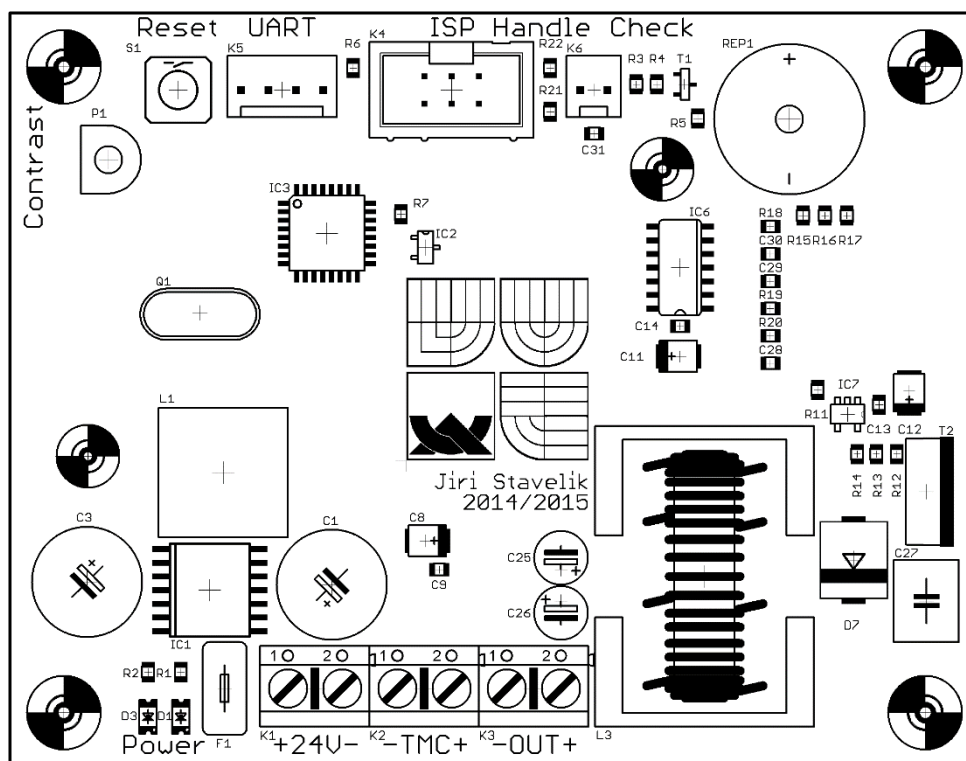


Obrázek 1.3: Výsledný motiv řídicí desky - vrchní strana



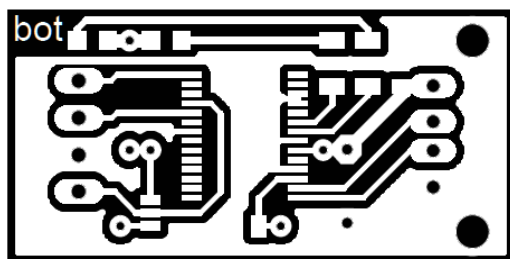
Obrázek 1.4: Výsledný motiv řídicí desky - spodní strana

## D.2 Osazovací plán řídicí desky



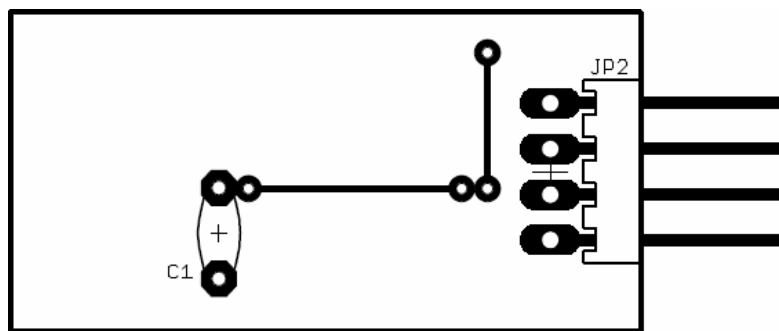
### D.3 Motiv plošného spoje převodníku úrovně

Rozměry plošného spoje činí (34 x 18) mm, rozlišení 600 dpi, M 2:1.

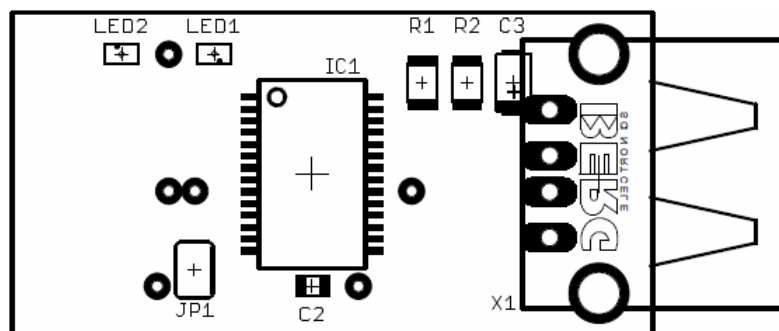


Obrázek 1.7: Výsledný motiv převodníku úrovně – spodní strana

### D.4 Osazovací plán převodníku úrovně



Obrázek 1.8: Osazovací plán převodníku úrovně - vrchní strana



Obrázek 1.9: Osazovací plán převodníku úrovně - spodní strana

## **E    Obsah přiloženého CD**

- elektronická verze bakalářské práce,
- schémata zapojení ve formátech \*.pdf. a \*.sch (Eagle 6.4.0),
- plošné spoje ve formátech gerber, \*.pdf a \*.brd (Eagle 6.4.0),
- program pro procesor ve formátu \*.hex a kompletní projekt pro Atmel Studio 6.1,
- katalogové listy zvolených komponent
- fotodokumentace.