

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací, ZČU v Plzni**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh řídicí jednotky pro elektrickou pec**

*Originál (kopie) zadání BP/DP*

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací řídicího systému pro elektrickou pec. Řídicí systém je tvořený vývojovým kytém NUCLEO-F411RE osazený mikrokontrolérem STM32F411RET6, mnou navrženou DPS osazenou teploměrem LM75A, displejem NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3, zesilovačem TS912 pro snímání napětí termočlátku typu K. Celé zařízení je tak schopné regulovat teplotu v peci pomocí PID regulátoru implementovaného softwarem a křivkou zadané teploty.

## **Key words**

Regulátor, mikrokontrolér, zpětná vazba, pulzní šířková modulace, rotační enkodér, C, Altium Designer, Atollic TrueSTUDIO for STM32, STM32

## **Abstract**

This bacillary deals with design and realization of the control system for electric oven. This controller is built on development kit NUCLEO-F411RE with microcontroller STM32F411RET6. Design of own PCB contains thermometer LM75A, display NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3, amplifier TS912 for measuring of voltage for K type thermocouple. The microcontroller is able of regulating temperature in the oven by PID regulator.

## **Key words**

Regulator, microcontroller, regulator feedback, pulse weight modulation, rotary encoder, C, Altium Designer, Atollic TrueSTUDIO for STM32, STM32

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Matyáš Zeman

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>6</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>7</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
• <b>TEORETICKÝ ÚVOD, KDE JE PROVEDEN ROZBOR PROBLEMATIKY.</b> .....	<b>8</b>
• <b>POSTUP NÁVRHU HW A ODŮVODNĚNÍ VOLBY DANÝCH KOMPONENT.</b> .....	<b>8</b>
• <b>POSTUP NÁVRHU SW</b> .....	<b>8</b>
• <b>TESTOVÁNÍ A KALIBRACE</b> .....	<b>8</b>
<b>2 HARDWARE</b> .....	<b>9</b>
2.1 VÝVOJOVÝ KIT NUCLEO-F411RE .....	9
2.2 STM32F411RET6 .....	10
2.3 ROTAČNÍ ENKODÉR.....	10
2.4 TERMOČLÁNEK TYP K .....	11
2.5 OPERAČNÍ ZESILOVAČ TS912IDT .....	12
2.6 INTEGROVANÝ KALIBROVANÝ TEPLOMĚR LM75AD.....	12
2.7 DISPLAY NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3 .....	13
2.8 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	13
2.9 NAPÁJECÍ ZDROJ .....	14
<b>3 SOFTWARE</b> .....	<b>15</b>
3.1 MOŽNOSTI POSTUPU NÁVRHU.....	15
3.2 STRUKTURA PROGRAMU .....	15
3.3 INICIALIZAČNÍ SEKVENCE.....	16
3.3.1 <i>Inicializace jednotlivých pinů</i> .....	17
3.3.2 <i>Inicializace časovačů</i> .....	18
3.3.3 <i>Inicializace LCD Displeje</i> .....	19
3.3.4 <i>Inicializace I<sup>2</sup>C sběrnice</i> .....	20
3.3.5 <i>Inicializace ADC</i> .....	21
3.3.6 <i>Inicializace PID struktury</i> .....	21
3.4 STRUKTURA HLAVNÍHO PROGRAMU .....	22
3.4.1 <i>Nekonečná smyčka</i> .....	22
3.4.2 <i>Přerušeni od vnějších periférií</i> .....	25
3.4.3 <i>Přerušeni od časovačů</i> .....	25
<b>4 ZÁVĚR</b> .....	<b>26</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>A</b>
<b>5 PŘÍLOHY</b> .....	<b>B</b>
5.1 DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	B
5.2 FOTOGRAFIE PROTOTYPU .....	C

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Vývojový kit NUCLEO-F411RE [1]	9
Obrázek 2 Výstupní signály ENCODÉRU [5]	10
Obrázek 3 Zapojení vývodů enkodéru [5]	11
Obrázek 4 Vnitřní zapojení termočlánu [5]	11
Obrázek 5 Grafy Teplotní závislosti jednotlivých typů termočlánu	11
Obrázek 6 Neinzerující zapojení operačního zesilovače	12
Obrázek 7 Zapojení LM75AD [10]	12
Obrázek 8 Blokové schéma zapojení plošného spoje	13
Obrázek 9 Schéma zapojení desky plošného spoje	14
Obrázek 10 Obecná struktura programu	15
Obrázek 11 Vývojový diagram inicializační sekvence	16
Obrázek 12 Struktura I/O portů [6]	17
Obrázek 13 Vývojový diagram inicializace I/O pinu	17
Obrázek 14 Vývojový diagram inicializace časovačů	18
Obrázek 15 Blokové schéma zapojení SPI sběrnice [6]	19
Obrázek 16 Blokové schéma zapojení I2C sběrnice [6]	20
Obrázek 17 Vývojový diagram inicializace A/D převodníku	21
Obrázek 18 Vývojový diagram nekonečné smyčky	22
Obrázek 19 Display - Hlavní menu	24
Obrázek 20 Display - Menu nastavení teploty	24
Obrázek 21 Display - Aktuální průběh	24
Obrázek 22 Blokový diagram interrupt/event linie [6]	25
Obrázek 23 Deska plošného spoje	B
Obrázek 24 fotografie prototypu 1	C
Obrázek 25 fotografie prototypu 2	C

# 1 Úvod

Předmětem této práce je vytvořit funkční návrh řídicí jednotky a její nastavení na parametry pece. Tento návrh musí skombinovat požadavky na ovládání a spolupracovat s vybavením v peci již použitým. Tím je především způsob měření a spínání pece. Návrh je tvořen ze 3 částí. A to jsou návrh hardwaru se všemi potřebnými vstupy a výstupy, návrh softwaru pro tento mikrokontrolér a nakonec jeho kalibrace na parametry pece. Poslední částí je sestavit jednoduchý návod k obsluze, nebo vytvořit ovládání dostatečně intuitivní.

Tuto práci lze tedy rozdělit na několik částí a to sice:

- **Teoretický úvod, kde je proveden rozbor problematiky.**
- **Postup návrhu HW a odůvodnění volby daných komponent.**
- **Postup návrhu SW.**
- **Testování a kalibrace.**



## 2 Hardware

Pro realizaci hlavní řídicí jednotky jsem zvolil vývojový kit NUCLEO-F411RE osazený mikrokontrolérem STM32F411RET6 od společnosti STM. Vývojový kit jsem zvolil na základě jejich dostupnosti a spolupráce společnosti s katedrou. Také jsem je již dříve využíval a to nejen v rámci předmětů zabývajících se touto problematikou. Také tento kit má výhodu snadného debugování, připojení a podpora tohoto kitu je velmi rozsáhlá.

### 2.1 Vývojový kit NUCLEO-F411RE

Vývojový kit NUCLEO-F411RE je univerzální platforma využívaná v mnoha aplikacích. Pro její snadné připojení, debugování, mnoho periferiemi a kompatibilitu se platformou Arduino je velmi populární.



Obrázek 1 Vývojový kit NUCLEO-F411RE [1]

Deska vývojového kitu obsahuje:

- STM32F411RET6 v pouzdru LQFP64
- 2 typy konektorů k konektorů k rozšíření
  - Arduino Uno Revision 3
  - STMicroelectronics Morpho rozšíření s vyvedením všech I/O portů
- ST-LINK/V2-1 debugger/programátor
- 2 uživatelské diody
- 2 uživatelská tlačítka
- USB s možností opakovaného vyčtení s podporou třech různých rozhraní
  - Virtuální Com port
  - Debugovací port
  - Velkokapacitní paměť pro programování drag'n'drop

[1]

Vývojový kit lze napájet z externího zdroje napětí (3,3 , 5 , 7-12V) nebo přímo z USB což je velmi výhodné pro programování a testování. Přímou na desce je také ST-LINK/V2-1 debugger/programátor s SWD konektorem.

## 2.2 STM32F411RET6

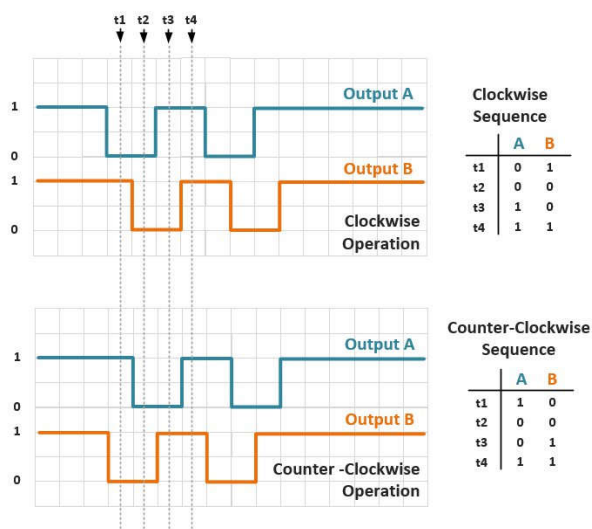
STM32F411RET6 je mikrokontrolér s širokou škálou využití a to díky mnoha periferiím a výkonnému RISC procesoru.

- ARM®32-bit Cortex®-M4 CPU s FPU
- 512 KB Flash
- 128 KB SRAM
- GPIO (50) s možností externího přerušení
- 12-bit ADC s 16 kanály
- RTC
- Časovač (8)
- I2C (3)
- USART (3)
- SPI (5)
- USB OTG Full Speed
- SDIO

[1]

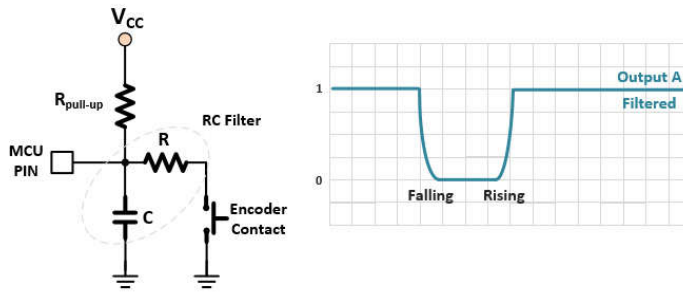
## 2.3 Rotační enkodér

Rotační enkodér je dynamický snímač polohy se dvěma výstupními signály, které jsou vzájemně fázově posunuty v závislosti na směru otáčení. Ideální způsob zjištění směru otáčení je detekovat všechny čtyři po sobě jdoucí hrany a vyhodnotit jejich sled.



Obrázek 2 Výstupní signály ENCODÉRU [5]

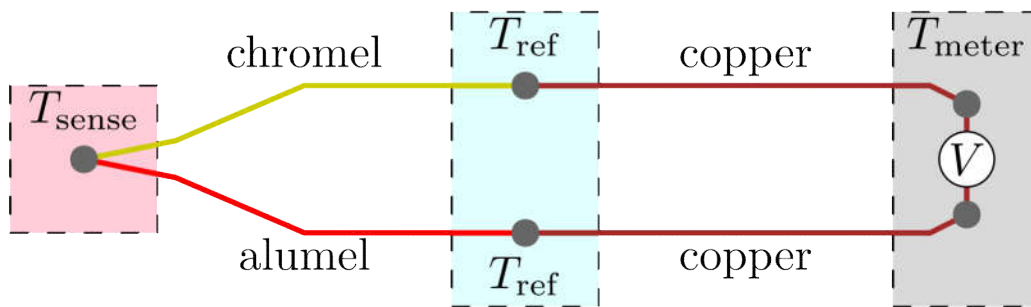
U enkodéru stejně jako u všech mechanických kontaktech spínačů dochází k záchvěvům (glitch) které je nutno určitým způsobem filtrovat. V tomto případě je filtrace provedena jednoduchým RC filtrem. Což jsme několikrát testovali pomocí osciloskopu.



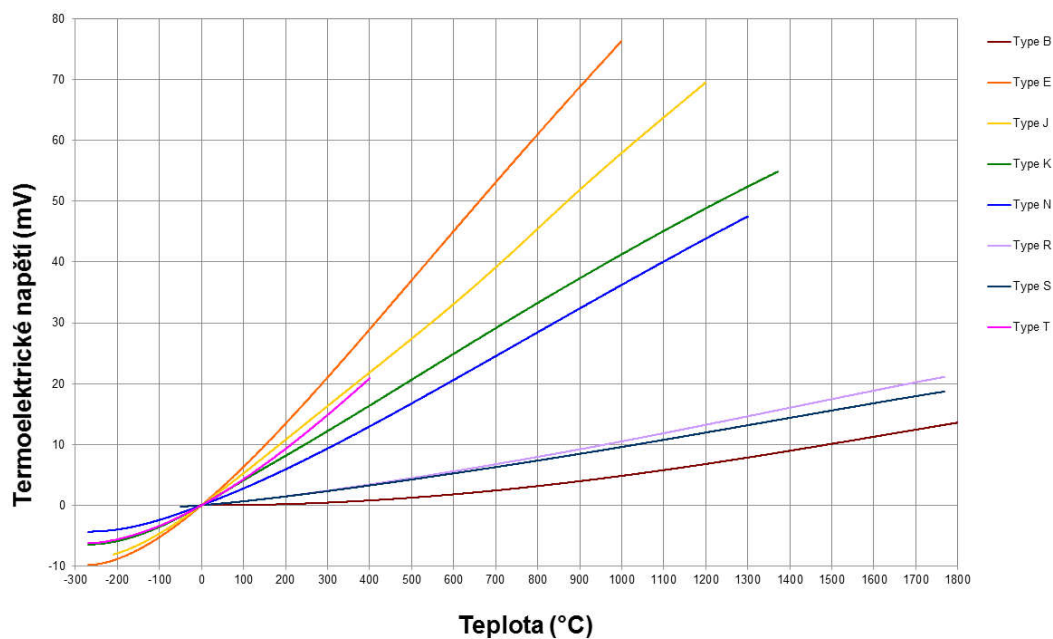
Obrázek 3 Zapojení vývodů enkodéru [5]

## 2.4 Termočlánek typ K

Termočlánek je zdroj proudu využívající termoelektrického jevu (Peltier-Seebeckův jev). Skládá se ze slitin kovů a to z NiCr a NiAl. Termočlánek měří rozdíl teplot mezi teplým a studeným koncem, což je v mnoha případech nutné kompenzovat. V tomto případě je ke kompenzaci použit teploměr na desce plošného spoje a software.



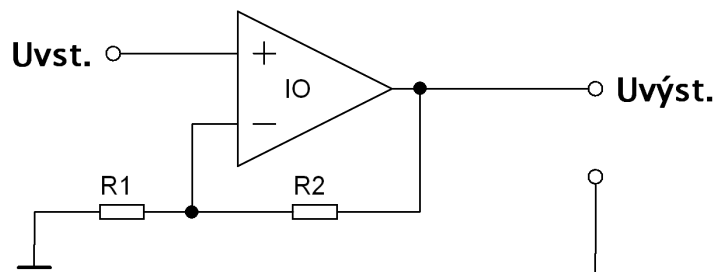
Obrázek 4 Vnitřní zapojení termočlánu [5]



Obrázek 5 Grafy Teplotní závislosti jednotlivých typů termočlánu

## 2.5 Operační zesilovač TS912IDT

Operační zesilovač pro zesílení výstupního signálu termočlánku je zde použit v standardním neinverzním zapojení. Byl zvolen na základě třech důležitých parametrů. Těmito parametry jsou SMD montáž, vhodná napájecí hladina a Rail-to-rail vstupním i výstupním rozsahem.



Obrázek 6 Neinverzní zapojení operačního zesilovače

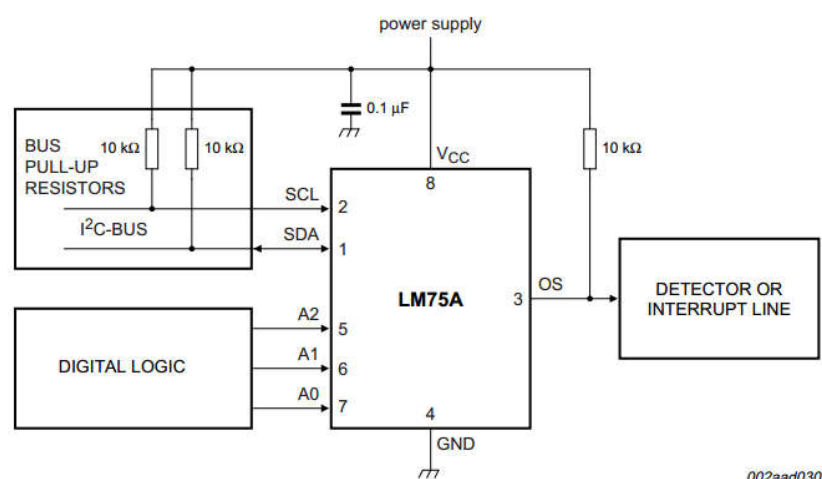
$$U_{\text{výst}} = U_{\text{vstup}} * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = U_{\text{vstup}} * \left(1 + \frac{56000}{1000}\right) = U_{\text{vstup}} * 57$$

Rovnice 1 Výpočet zesílení

Zesílení bylo zvoleno vzhledem k maximální hodnotě výstupního napětí termočlánku a maximálnímu rozsahu A/D převodníku mikrokontroléru pro zvýšení přesnosti.

## 2.6 Integrovaný kalibrovaný teploměr LM75AD

Tento teploměr je ideální pro tuto aplikaci pro snadnou komunikaci přes I<sup>2</sup>C sběrnici a požadovanou přesnost.



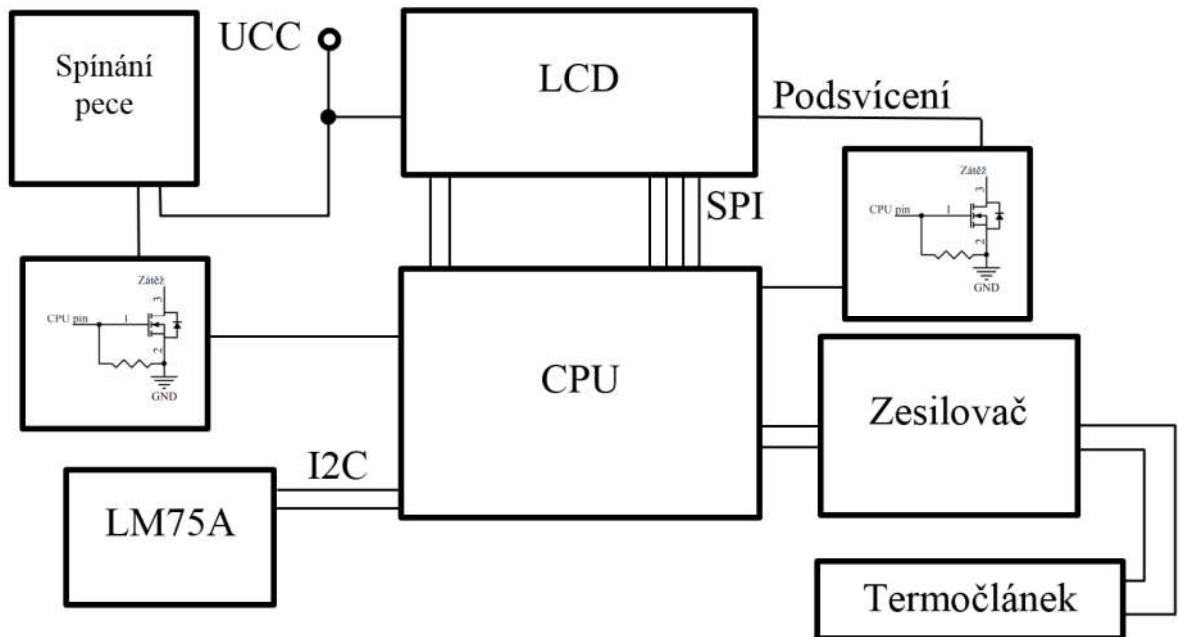
Obrázek 7 Zapojení LM75AD [10]

## 2.7 Display NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3

Tento display řízený mikrokontrolérem ST7565R umožňuje komunikaci přes SPI sběrnici a poskytuje dostatečné rozlišení pro reprezentaci všech potřebných dat ke snadné obsluze celého zařízení.

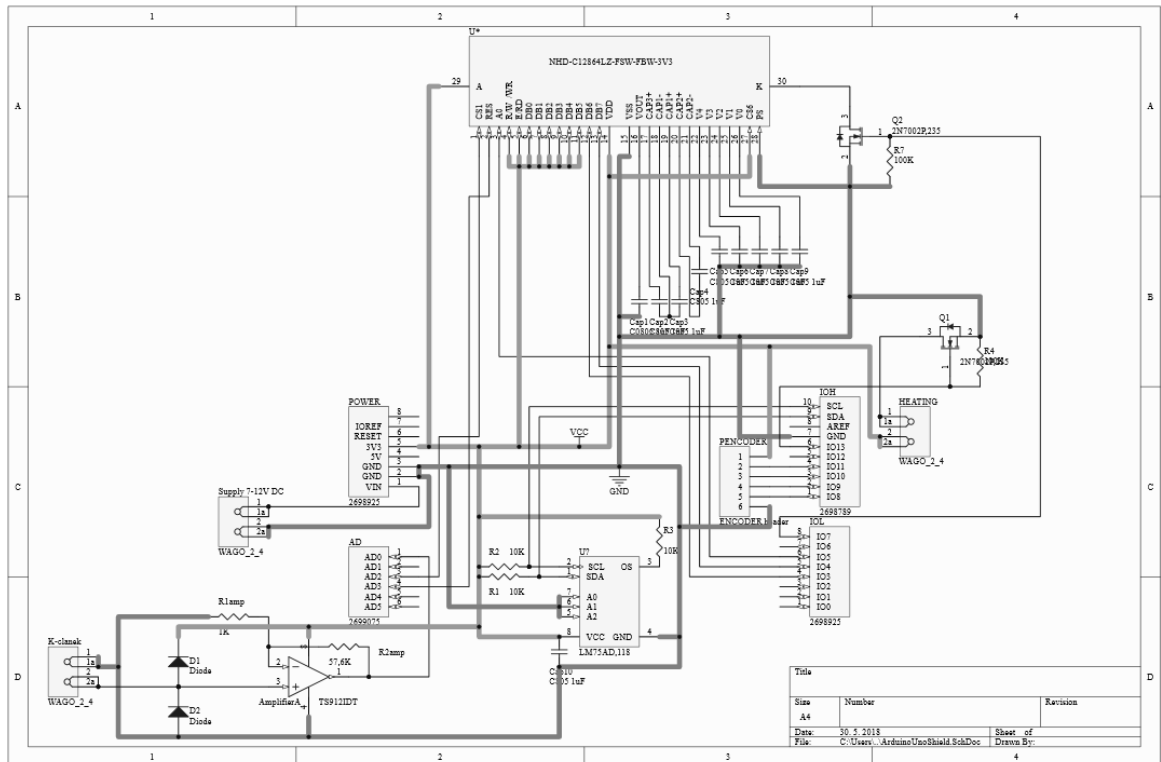
## 2.8 Deska plošného spoje

Deska plošného spoje byla navržena pomocí softwaru AltiumDisigner. Hlavními limitujícími faktory při návrhu byly rozměry otvoru v čelním panelu pece pro umístění displaye a jeho možné uchycení a Rozměry konektorů pro připojení vývojového kitu.



Obrázek 8 Blokové schéma zapojení plošného spoje

Na základě základě bokového schématu blokového schématu a požadavků jednotlivých obvodů dle specifikací bylo možné pokročit k návrhu zapojení.



Obrázek 9 Schéma zapojení desky plošného spoje

Dále při návrhu rozložení součástek bylo nutné brát v potaz realizovatelnost při ručním pájení, rozložení v závislosti na rozměrech čelního panelu pece a technických otvorech.

Pro realizovatelnost ručního pájení byl zvolen rozměr pasivních SMD součástek 0805 mil, k tomu odpovídající ostatní pouzdra a velikost otvorů pro prokovy 0,6mm.

## 2.9 Napájecí zdroj

Dle specifikace [13] strana 20 kapitola 6.3, jsem se rozhodl pro zjednodušení návrhu využít vnitřní stabilizátor vývojového kitu spolu s externím zdrojem. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1 je možné na pin  $V_{IN}$  přivést napětí 7-12V, takže je možné široké škály běžně prodávaných zdrojů. Zapojení tohoto vstupu je možné nalézt v [13] strana 63, obrázek 27.

### 3 Software

Pro tvorbu softwaru bylo možné zvolit několik cest a úrovní programování, které bylo nutno zvážit před začátkem práce.

#### 3.1 Možnosti postupu návrhu

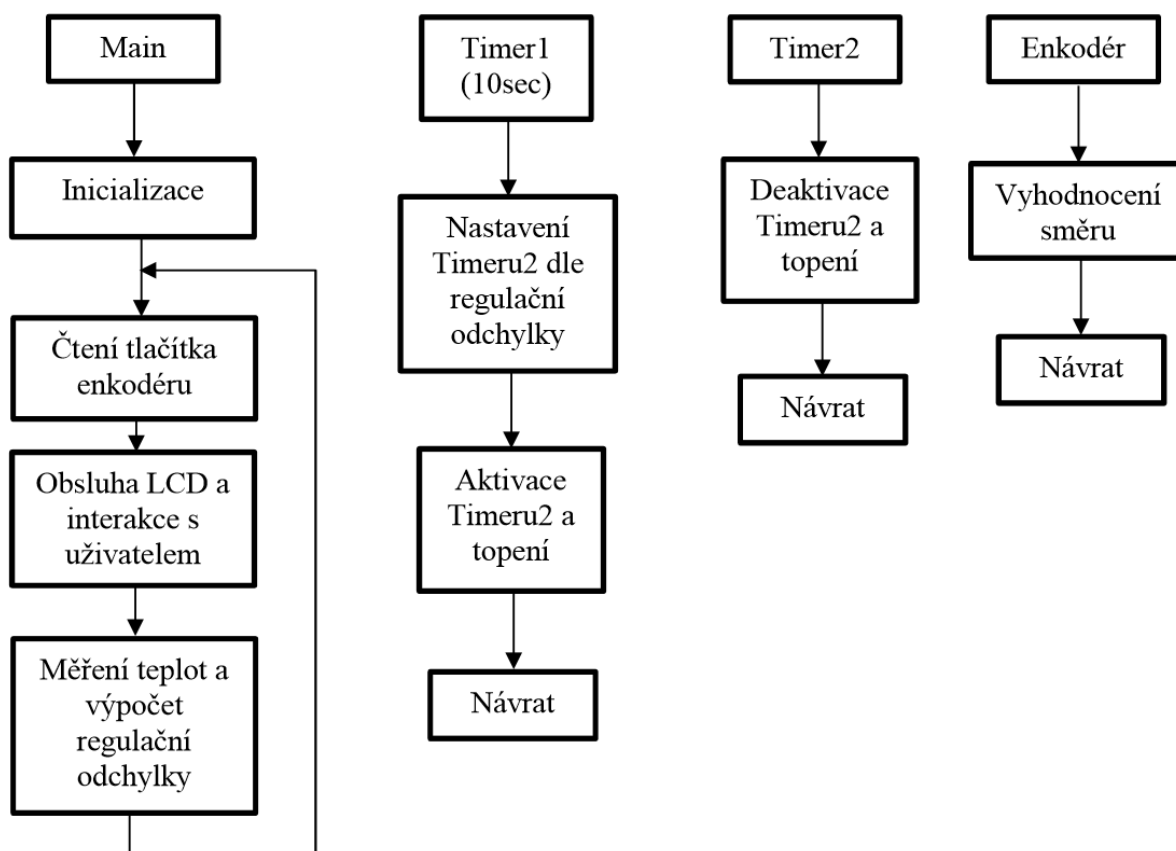
První a nejpohodlnější možností je STM32Cube kde je možné veškerá nastavení vývojového kitu možné nastavit pouhým klikáním. Bohužel tato cesta není optimální vzhledem k práci s debuggovaním a časováním. Tyto vlastnosti takto generovaného kódu jsem měl možnost jak pozorovat v rámci předmětu Mikroprocesorová technika si je sám vyzkoušet právě při rozhodování o směřování této práce.

Druhou možností je využití existujících knihoven, jako jsou například mbed [1], nebo hal[4]. Jedná se o velice efektivní nástroje doporučené i společností STM. Jediným problémem pro práci s nimi je, že není vždy jasné, co se pod některými funkcemi skrývá a pokud chceme k nějaké periférii přistupovat nestandardně, tak to nemusí být možné, nebo dokonce může docházet ke kolizím.

Z těchto důvodů jsem došel k závěru, že optimální způsob bude napsat funkce přímo pro práci s registry a řídit všechny procesy na té nejnížší úrovni. S tímto přístupem k tomuto vývojovému kitu jsem již měl určité zkušenosti vzhledem k cyklu předmětu Mikroprocesorová technika a mohl jsem tak čerpat ze svých zkušeností.

#### 3.2 Struktura programu

Program se skládá z inicializace, nekonečné smyčky a čtyř přerušení. Původně zamýšlená struktura se musela lehce pozměnit vzhledem k určitým hardwarovým problémům, ke kterým se dostaneme v kapitole 3.4.2.

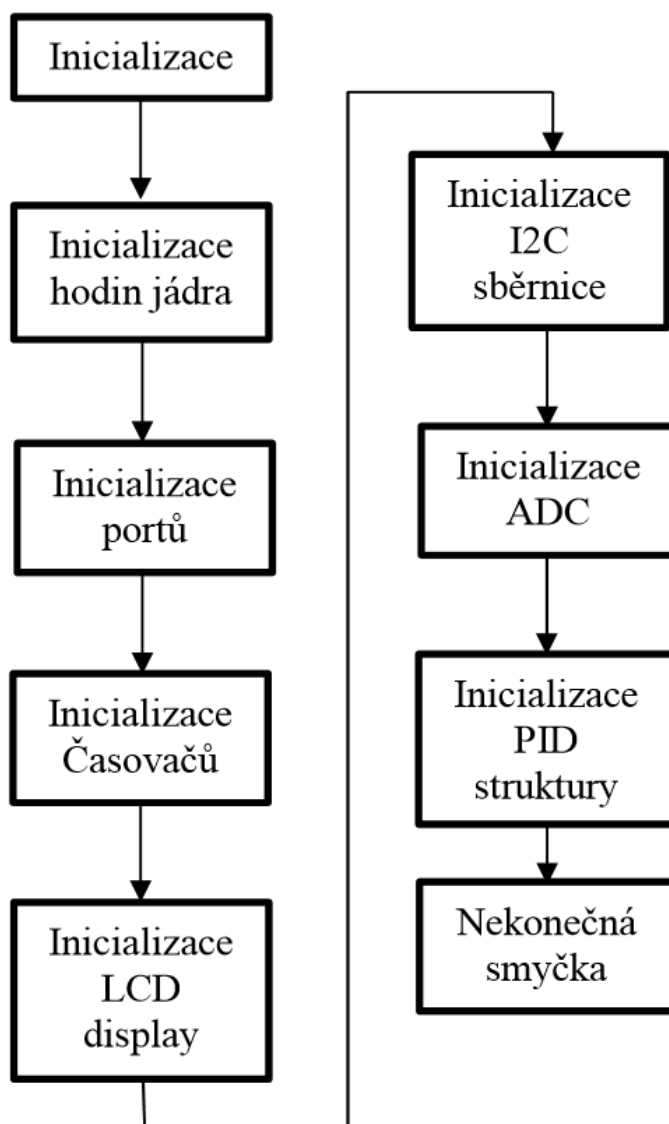


Obrázek 10 Obecná struktura programu

### 3.3 Inicializační sekvence

Vzhledem k volbě práce přímo s registry bylo možné vyčíst všechny potřebné data přímo z referenčního manuálu [6]. U každé periferie je dán postup její korektní inicializace, která spočívá v inicializaci hodin periferie, nastavení řídicích registrů a aktivování periferie.

Jako první je nutné inicializovat hodiny jádra procesoru, které jsme nastavili na 100MHz. Od těchto hodin se ostatní hodiny odvozují pomocí čítačů. Tato inicializace je provedena pomocí knihovních funkcí CMSIS(Cortex Microcontroller Software Interface Standard), které jsou pro práci s tímto kitem téměř nezbytné. Na všechny adresy řídicích registrů se pomocí těchto knihoven dostaneme pomocí přehledných struktur.

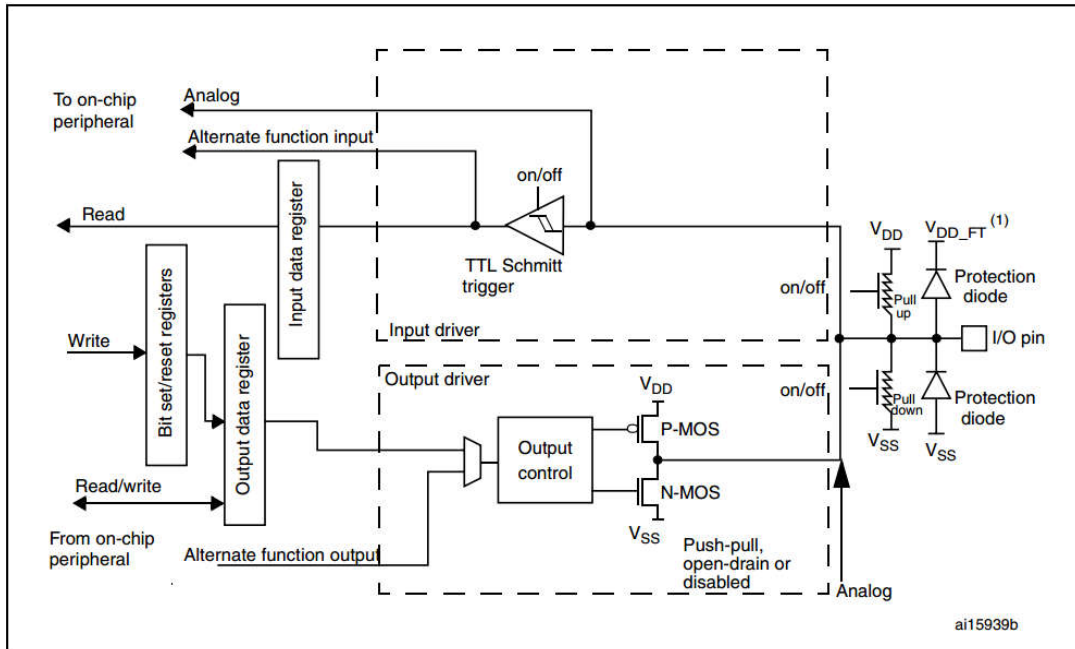


Obrázek 11 Vývojový diagram inicializační sekvence

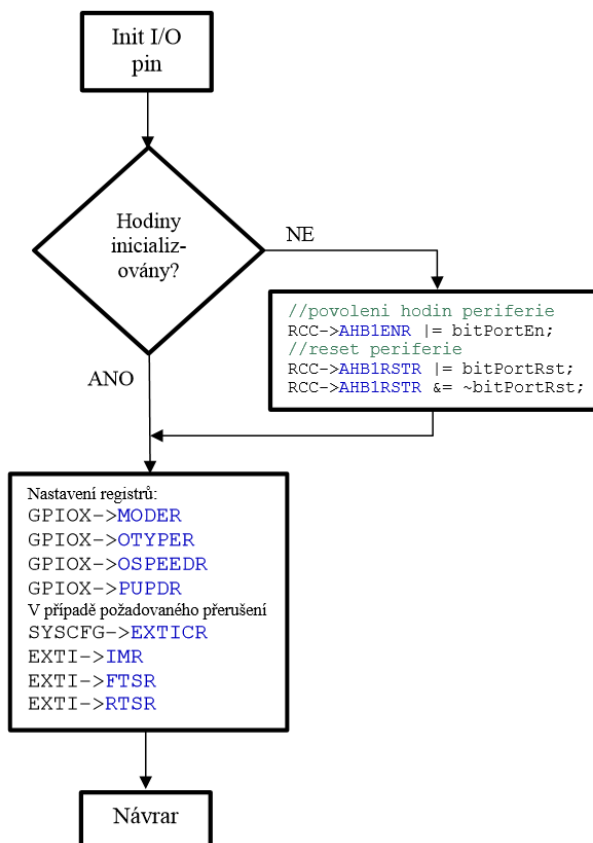


### 3.3.1 Inicializace jednotlivých pinů

Jak je zřejmé z obrázku 11 tak každý pin má mnoho funkcí a možných nastavení, která musí být jednoznačná pro požadovanou funkci pinu. Prvním krokem je nastavení hodin brány pro možnost komunikace s periferií. Poté nastavení řídicích registrů viz [6] strana 153 kapitola 8.4. V případě požadovaného přerušení dále dle [6] strana 205 kapitola 10.3.



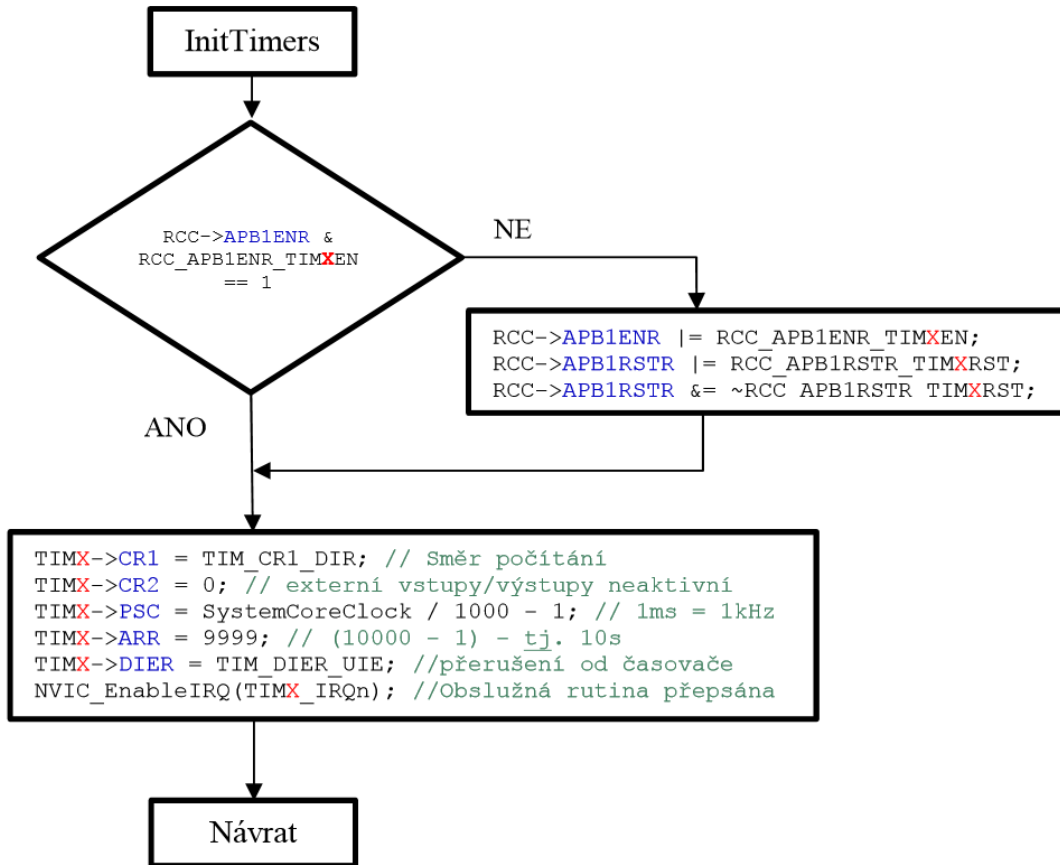
Obrázek 12 Struktura I/O portů [6]



Obrázek 13 Vývojový diagram inicializace I/O pinu

### 3.3.2 Inicializace časovačů

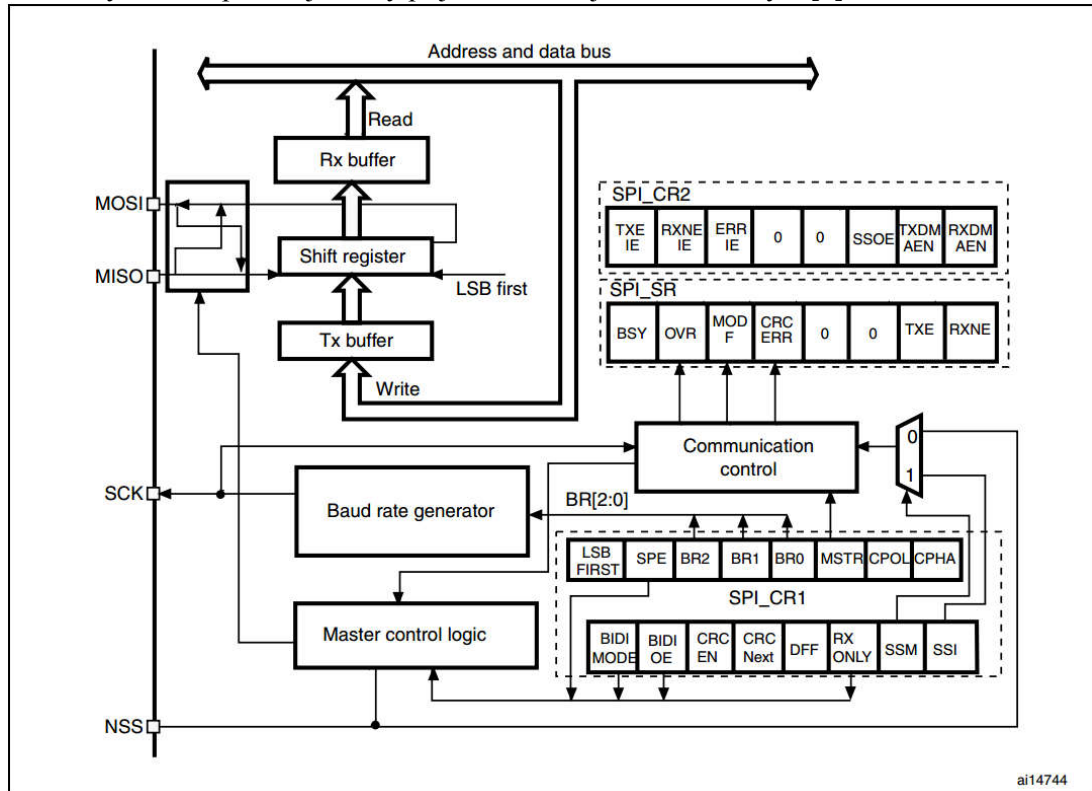
V tomto systému využíváme tři časovače. První pro funkci SysTick, která inkrementuje globální proměnou `_SysTick` po jedné milisekundě a její inicializace i obsluha je řešená pomocí knihoven CMSIS. Dále používáme dva časovače pro přesné řízení doby sepnutí pece, jež bylo nutné inicializovat viz obrázek 14.



Obrázek 14 Vývojový diagram inicializace časovačů

### 3.3.3 Inicializace LCD Displeje

Tato inicializace se skládá ze dvou částí. A to jsou inicializace SPI sběrnice a poté mikrokontroléru ST7565R přes tuto sběrnici. SPI sběrnice se inicializuje pouze přepnutím portů na alternativní funkci pomocí registru `GPIOX->AFR` dle [7] strana 47 Tabulka 9 a parametrů pro tuto sběrnici dle [6] strana 552 kapitola 20.3. Veškeré další parametry jsou určeny stranou pomalejší, tedy přijímače které jsou definovány v [8] strana 9.



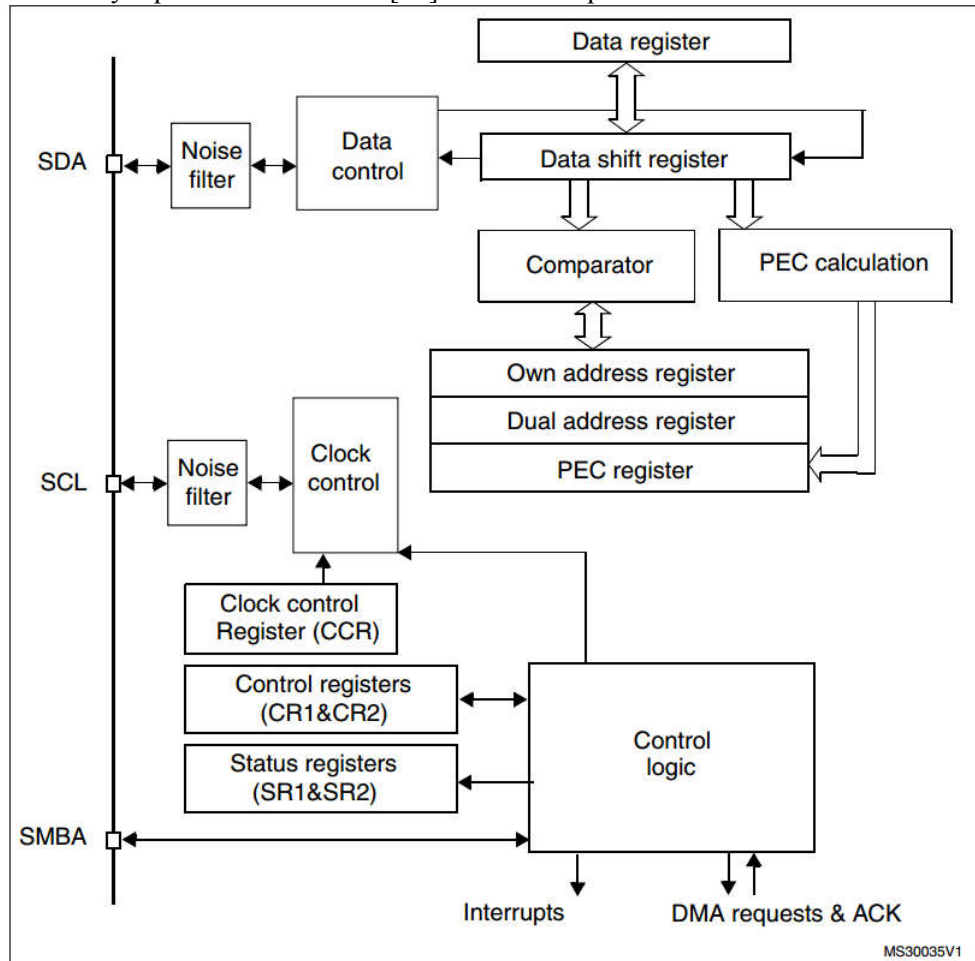
Obrázek 15 Blokové schéma zapojení SPI sběrnice [6]

ST7565R vyžaduje inicializaci zasláním sekvence dat viz [8] strana 10. Celá tato sekvence je podrobněji popsána v [9] strana 49 s významy jednotlivých instrukcí.

### 3.3.4 Inicializace I<sup>2</sup>C sběrnice

Stejně jako pro sběrnici SPI je potřeba inicializovat dané piny pro alternativní funkci pomocí registru `GPIOX->AFR` dle [7] strana 47 Tabulka 9. Dále je nutné nastavit odpovídající bit v registru `GPIOX->OTYPER` do stavu otevřený kolektor dle [6] strana 154 kapitola 8.4.2.

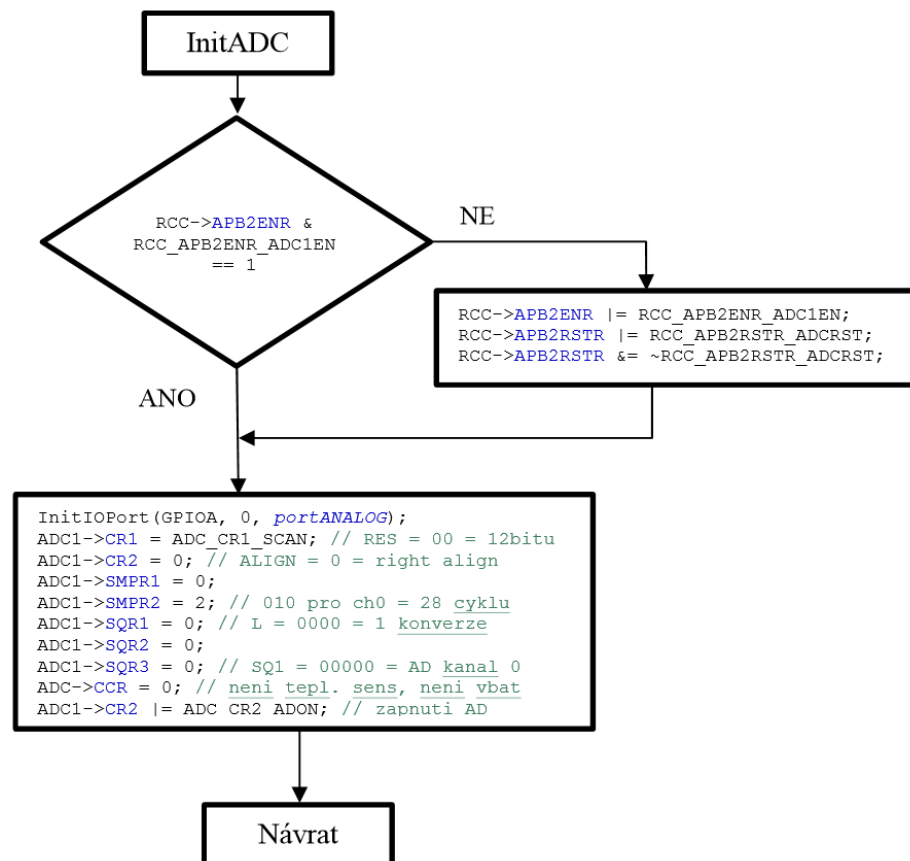
Další funkce a parametry přenosu jsou nastaveny dle [6] strana 563 kapitola 18.6. Parametry jsou vybrány dle vlastností pomalejšího zařízení, které je v tomto případě SMD kalibrovaný teploměr LM75A dle [10] strana 16 kapitola 12 tabulka 18.



Obrázek 16 Blokové schéma zapojení I<sup>2</sup>C sběrnice [6]

### 3.3.5 Inicializace ADC

ADC převodník je jedna ze složitějších periférií na konfiguraci, protože má mnoho funkcí a dle aplikace v nám zvoleném zapojení a je na nás jaké vlastnosti upřednostňujeme. Zde jsme zvolili jednorázový převod s čekáním na konec převodu a 12-ti bitový rozsah. Jedná se o velmi jednoduchý způsob, který je pro tuto aplikaci ideální z důvodu vysoké přesnosti a snadné obsluhy. Důležité události jsou řízeny pomocí přerušení a tak čekací doba při převodu nevádí. Nastavení všech řídicích registrů bylo zvoleno na základě [6] strana 210 kapitola 11.3 s hodnotami registrů dle [6] strana 224 kapitola 11.12.



Obrázek 17 Vývojový diagram inicializace A/D převodníku

### 3.3.6 Inicializace PID struktury

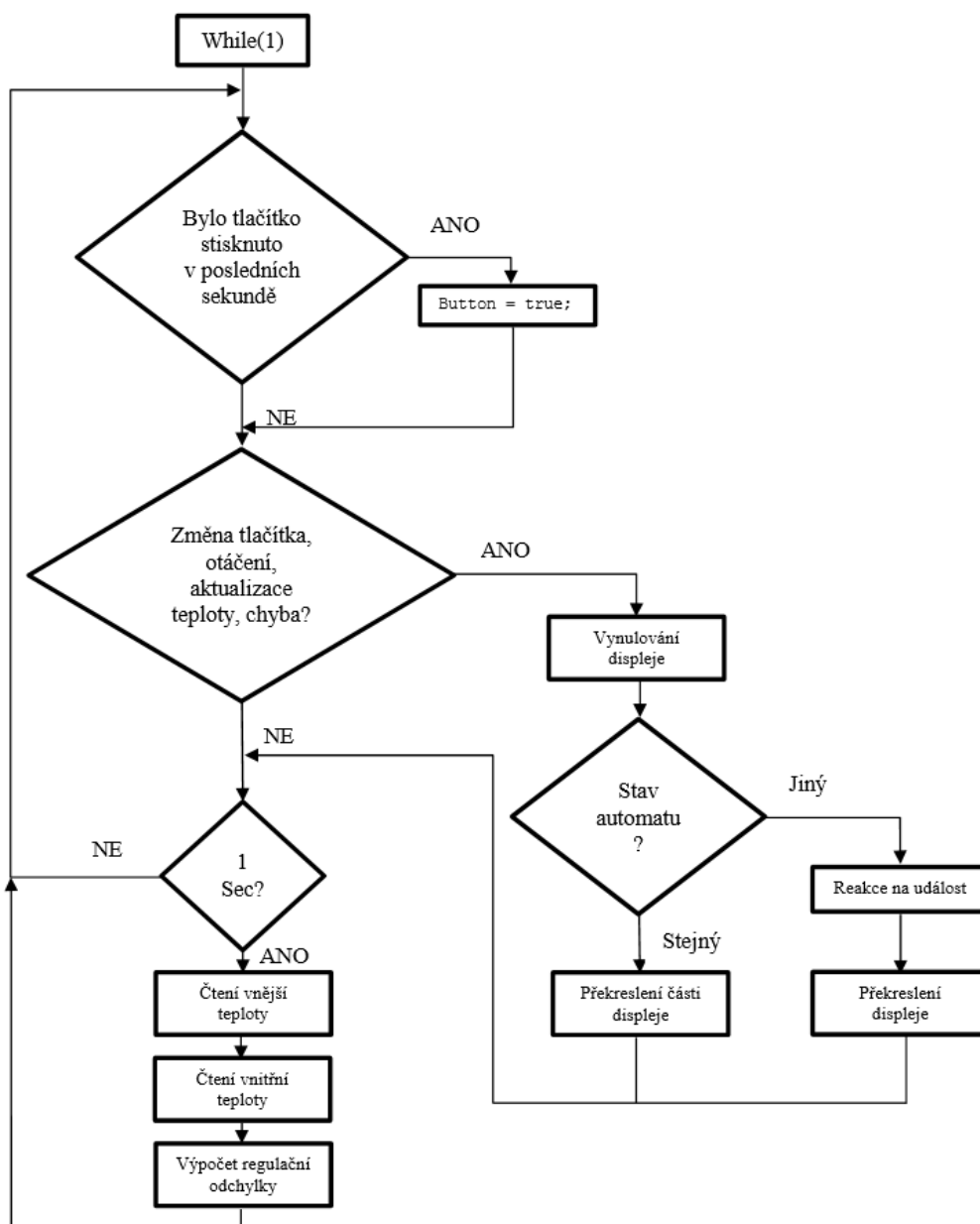
PID struktura se inicializuje pouze vytvořením a zvolením konstant a mezí, které mohou být změněny uživatelem, nebo programátorem při kalibraci přímo na zařízení.

### 3.4 Struktura hlavního programu

Hlavní část programu se skládá z nekonečné smyčky a několika přerušení u kterých dochází ke konfliktům, je tedy nutné je částečně omezovat hlavním programem. Tím je myšleno především zbytečné přepisování displeje a zbytečně časté čtení teplot. Proto k měření teplot a výpočtu regulační odchylky dochází pouze jednou za vteřinu a ke změnám na displeji dochází jen se změnou zobrazovaných dat.

#### 3.4.1 Nekonečná smyčka

V hlavní smyčce je pouze pět funkcí a to čtení tlačítka enkodéru, reakce na enkodér a tudíž stav programu, výpis dat na display, čtení vnitřních a vnějších teplot a výpočet regulační odchylky. Viz obrázek 10. U obsluhy displeje se jedná o stavový automat Mealyho typu. Stavů tohoto automatu jsou MMenu, SetTemp, Progres a Error.



Obrázek 18 Vývojový diagram nekonečné smyčky

### 3.4.1.1 Čtení vnější teploty

Vnější teplota je poskytována SMD teploměrem LM75A prostřednictvím sběrnice I<sup>2</sup>C a je využívána k částečné kompenzaci studeného konce termočlánu. Tato kompenzace je bohužel s aktuálním termočlánkem rovna nule a to z důvodu, že pro tento konkrétní termočlánek je statická chyba přesně rovna pokojové teplotě. Což je samozřejmě náhoda, která se při výměně termočlánu s velkou pravděpodobností nebude opakovat a proto musí být tato kompenzace i nadále možná.

### 3.4.1.2 Čtení vnitřní teploty pece

Teplota pece je měřena A/D převodníkem mikrokontroléru přes vnější zesilovač v neinvertním zapojení viz kapitola 2.5. Dále bylo nutné z katalogového listu termočlánu typu K [3] vytvořit pole, ve kterém bude možné vyhledávat. Z tohoto pole byl dále vytvořen i obrázek číslo 5. Pro snadné použití jsem se rozhodl pole zjednodušit na řádkový vektor ve kterém pozice odpovídá teplotě ve stupních celsia a hodnota prvků přímo počtu bitů A/D převodníku této teplotě odpovídající. Toto zjednodušení jsem si mohl dovolit díky předpokladu absence záporných teplot a rozlišovací schopnosti A/D převodníku.

Dále bylo možné metodou půlení intervalu vyhledat odpovídající teplotu aktuálnímu zesílenému napětí na termočlánu v tomto vektoru. Teno algoritmus se zjednodušil právě využitím pointeru přímo jako hodnoty teploty. Pokud je tedy změna při půlení menší než dva stupně je tato hodnota předána k dalšímu zpracování dle kapitoly 3.4.1.1

### 3.4.1.3 Výpočet regulační odchylky PID regulátoru

Nastavení a určení konstant PID regulátoru je velice rozsáhlá problematika s mnoha možnými přístupy. Na rozdíl do PID regulátoru jako takového. Dle [12] strana 23 jsem navrhl PID regulátor, jenž počítá odchylku každou sekundu a jednou za 10 sekund reaguje díky sadě přerušení. Vstupní hodnotou pro tento regulátor jsou poslední výstupní hodnota, maximum a minimum doby sepnutí (0-10sec), chyba od požadované hodnoty, kterou získáme z grafu požadované mínus reálná teplota v peci získaná pomocí termočlánu.

### 3.4.1.4 Výpočet požadované hodnoty

Jelikož je požadovaná teplota zadávána pomocí několika bodů teplotního profilu tak je nezbytné aktuální požadovanou teplotu nutné dopočítat. Pro dosažení správné hodnoty jsou dva body, mezi kterými se tato hodnota na časové ose nachází, proloženy přímkou a přesná hodnota je dopočtena dosazením aktuálního času.

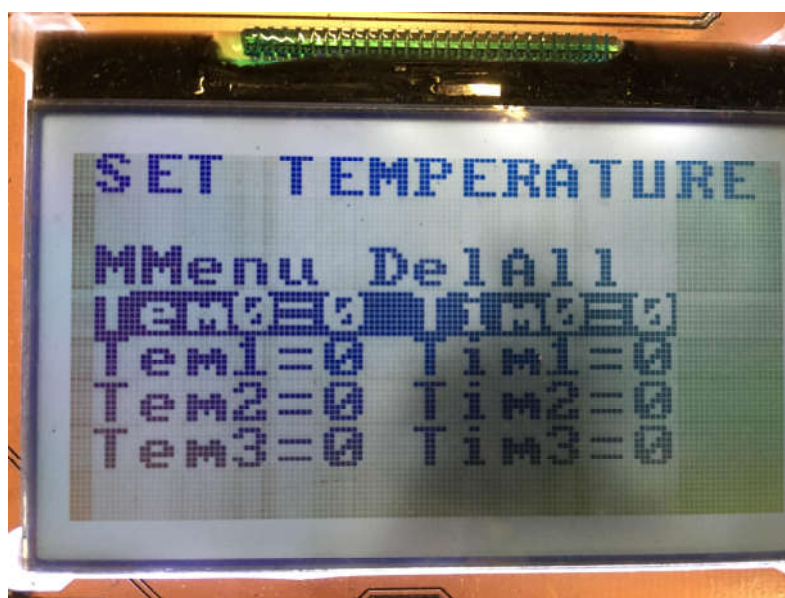
### 3.4.1.5 Výpis na display

K výpisu na display byly využity knihovny a funkce jenž jsme vytvořili a používali na cvičeních z předmětu Mikroprocesorová technika. Velice užitečné byl především vektor fontů, který výpis dosti zesadnil. Jak je možné vidět na obrázcích 19,20 a 21 tak displej je lehce poškozený díky díky přepájení z prvního testovacího prototypu na druhý a to způsobuje skvrnu v podsvícení a především horizontální a vertikální čáry při vykreslování.

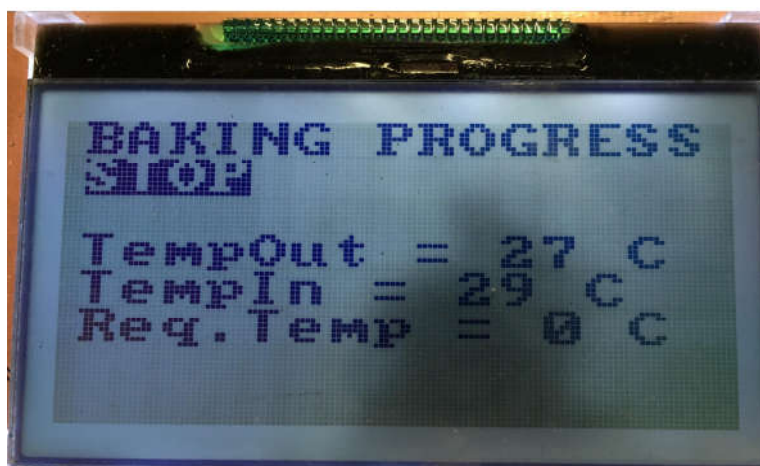
Podbarvené pole je aktuální hodnota kurzoru, od které se odvíjí celá interakce s uživatelem. Jelikož jsem se rozhodl k užívání pouze enkodéru, tak musí i celé menu být velice jednoduché a intuitivní.



Obrázek 19 Display - Hlavní menu



Obrázek 20 Display - Menu nastavení teploty



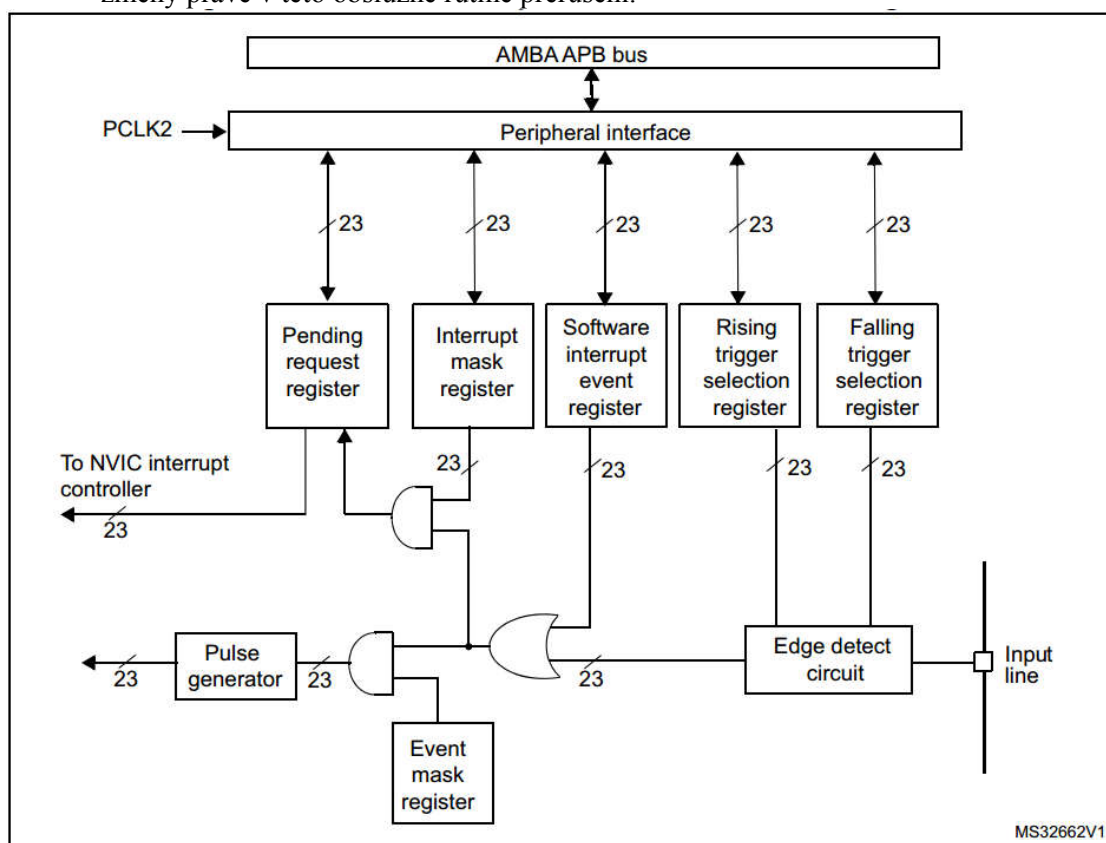
Obrázek 21 Display - Aktuální průběh



### 3.4.2 Přerušení od vnějších periférií

Dle [6] strana 137 kapitola 7.2.3 a [6] strana 198 kapitola 10.2 pro přerušení na všech branách pro piny 5-9 je stejný kód přerušení což znamená jedna obslužná rutina, takže je dále nutné je vyčítat ručně v obslužné rutině tohoto přerušení. Po mnoha hodinách testování jsme došli k závěru, že tyto cesty trpí určitou závadou blíže nespecifikovanou v [6], [7] nebo [11] což je závažnou překážkou v optimálním návrhu tohoto řídicího systému. Především z důvodu, že při návrhu hardwaru byla vlastnost sdílení obslužné rutiny pro všechny vývody enkodéru považována za výhodu, která usnadní návrh softwaru. Aktuální verze reaguje pouze na hrany od pinu GPIOA9, což při obsluze způsobuje pomalejší reakci zařízení.

Dále jedním z užívaných přerušení je od dokončení přenosu SPI sběrnice, které koliduje právě s přerušeními od enkodéru a je proto nutné omezit výpis na display pouze na změny. Což není problémem, protože překreslení displeje je iniciováno až vyhodnocením změny právě v této obslužné rutině přerušení.



Obrázek 22 Blokový diagram interrupt/event linie [6]

### 3.4.3 Přerušení od časovačů

Časovač Timer2 se spustí po stisknutí enkodéru v hlavním menu na pozici start. Po uplynutí 10 sekund se periodicky spustí obslužná rutina tohoto přerušení, kde se vyčte spočtená hodnota regulační odchylky, podle které se nastaví doba do vypnutí topení pomocí Timer3 který se následně spustí. Timer2 je v režimu cyklického běhu a Timer3 v režimu jednorázového odpočtu. Viz [6] strana 306 kapitola 13.2.

Samozřejmě je v obslužné rutině od Timer2 vyhodnocení požadavku na nulovou a plnou dobu sepnutí a v těchto případech se Timer3 vůbec nespouští.

## 4 Závěr

Dle zadání je možné do tohoto mikrokontroléru zadat hodnoty teplotního profilu, až do 10 hodnot. Vhodnost řídicího algoritmu jakožto PID regulátoru je sice očividná, ale vzhledem k jeho nedostatečné kalibraci přímo na zařízení není možné tento bod zcela prokázat. Bezpochybně se však jedná o zlepšení oproti současnému řešení, které je pouze zapnuto/vypnuto.

Bohužel se aktuální řešení vzhledem k mnoha problémům vztahujících se k pochybením při návrhu plošného spoje a obtížím s přerušeními blíže popsáním v kapitole 3.4.2 nepodařilo uvést zatím do plynulého provozu a je stále ve stavu testování a kalibrace.

Při návrhu plošného spoje totiž došlo k obrácení konektoru displeje o 180° a nutnosti návrhu nového. Tento displej totiž v návrhovém prostředí Altium Designer měl definovanou pouze schematickou značku a nikoliv model součástky. Bohužel vývody ve schématu byly očíslované v opačném pořadí a mou nepozorností došlo k této chybě, která byla odhalena, až při testování SPI sběrnice pomocí osciloskopu.

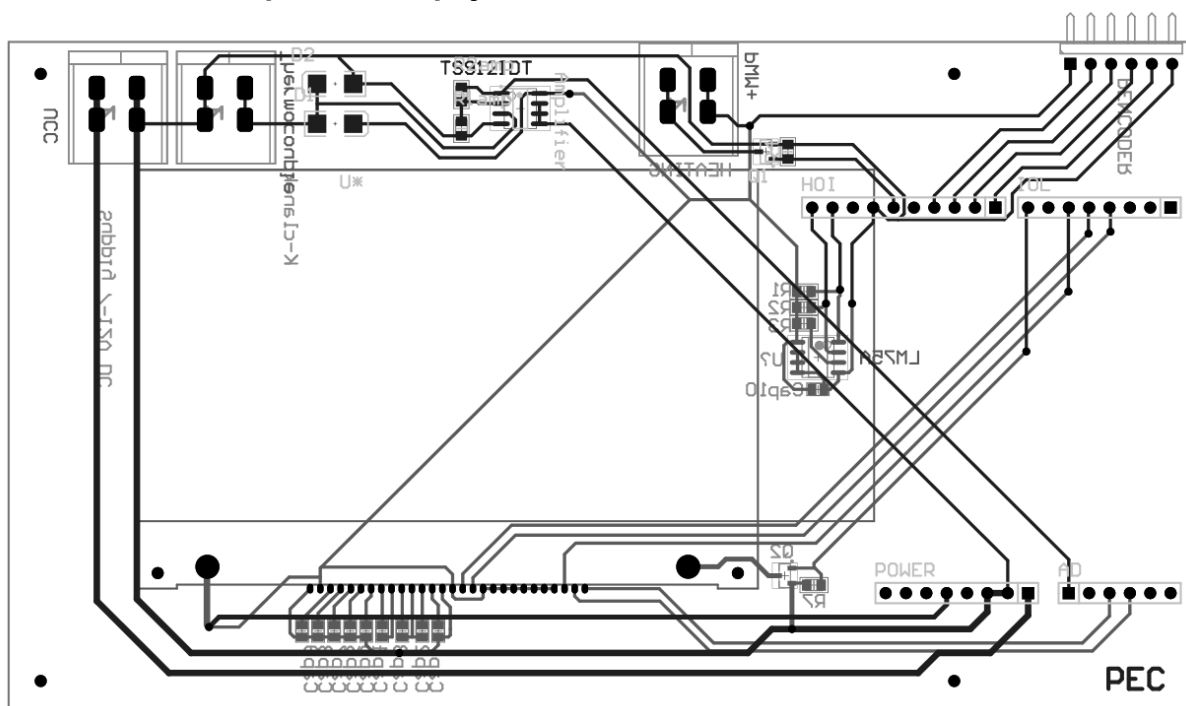
Druhé velké zdržení způsobili externí přerušení od enkodéru, které na tomto vývojovém kitu vyvolávají obslužnou rutinu pouze za určitých nedefinovaných podmínek, což vedlo k nutnosti jiného způsobu zachycení těchto signálů, který není optimální. Bohužel místo okamžitého využití jiného způsobu jsem strávil několik dní analýzou tohoto problému.

## Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] mbed. *ST-Nucleo-F411RE* [Online]. [cit. 2018-03-06]. Dostupné z: <https://os.mbed.com/platforms/ST-Nucleo-F411RE/>
- [2] Přemysl, Š. *Návrh PID regulátorů pro systémy s dopravním zpožděním* [Online]. [cit. 2018-01-10] Dostupné z: [https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/4/45/Bp\\_2010\\_sestak\\_premysl.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/4/45/Bp_2010_sestak_premysl.pdf)
- [3] jsp. *termoclanek-k-nicr-nial* [Online]. [cit. 2018-03-06] Dostupné z: [http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam\\_dle\\_kategorie/snimace\\_teploty/referencni\\_tabulky/termoclanek-k-nicr-nial.html](http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategorie/snimace_teploty/referencni_tabulky/termoclanek-k-nicr-nial.html)
- [4] stm32f4-discovery. *HAL libraries* [Online]. [cit. 2018-05-01] Dostupné z: <http://stm32f4-discovery.net/2015/07/all-stm32-hal-libraries/>
- [5] allaboutcircuits. *Use a rotary encoder in a mcu based project* [Online]. [cit. 2018-01-03] Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com>
- [6] st. *Reference manual* [Online]. [cit. 2017-11-05] Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference\\_manual/9b/53/39/1c/f7/01/4a/79/DM00119316.pdf/files/DM00119316.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119316.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/reference_manual/9b/53/39/1c/f7/01/4a/79/DM00119316.pdf/files/DM00119316.pdf/jcr:content/translations/en.DM00119316.pdf)
- [7] st. *CPU datasheet* [Online]. [cit. 2017-11-05] Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/b3/a5/46/3b/b4/e5/4c/85/DM00115249.pdf/files/DM00115249.pdf/jcr:content/translations/en.DM00115249.pdf>
- [8] mouser. *Datasheet* [Online]. [cit. 2017-10-20] Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/291/NHD-C12864LZ-FSW-FBW-3V3-48407.pdf>
- [9] newhavendisplay. *Datasheet* [Online]. [cit. 2018-03-11] Dostupné z: [http://www.newhavendisplay.com/app\\_notes/ST7565R.pdf](http://www.newhavendisplay.com/app_notes/ST7565R.pdf)
- [10] nxp. *Datasheet* [Online]. [cit. 2018-02-8] Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/LM75A.pdf>
- [11] st. *Programming manual* [Online]. [cit. 2017-11-05] Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming\\_manual/6c/3a/cb/e7/e4/ea/44/9b/DM00046982.pdf/files/DM00046982.pdf/jcr:content/translations/en.DM00046982.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/programming_manual/6c/3a/cb/e7/e4/ea/44/9b/DM00046982.pdf/files/DM00046982.pdf/jcr:content/translations/en.DM00046982.pdf)
- [12] wescottdesign. *Software PID* [Online]. [cit. 2018-06-01] Dostupné z: <http://www.wescottdesign.com/articles/pid/pidWithoutAPhd.pdf>
- [13] st. *Kit datasheet* [Online]. [cit. 2017-11-05] Dostupné z: [http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/98/2e/fa/4b/e0/82/43/b7/DM00105823.pdf/files/DM00105823.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105823.pdf](http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/98/2e/fa/4b/e0/82/43/b7/DM00105823.pdf/files/DM00105823.pdf/jcr:content/translations/en.DM00105823.pdf)

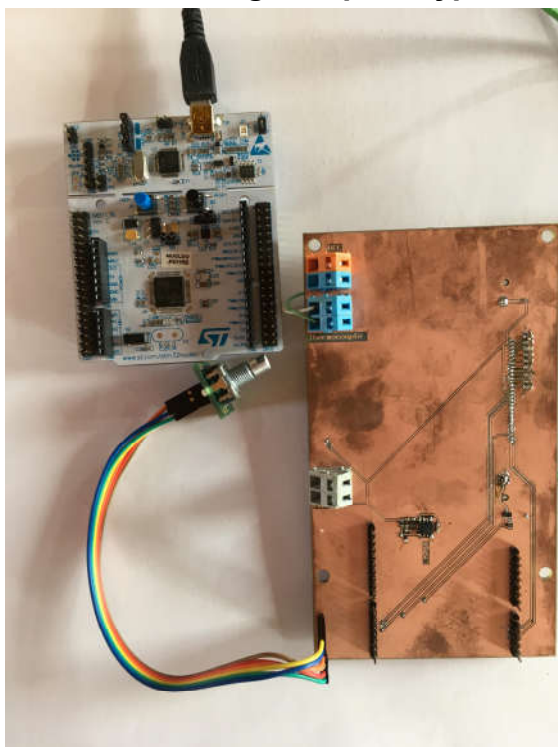
## 5 Přílohy

### 5.1 Deska plošného spoje

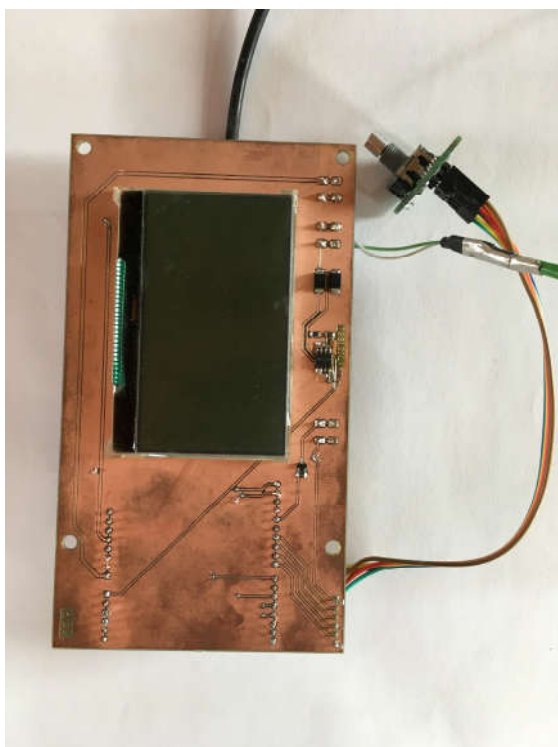


Obrázek 23 Deska plošného spoje

## 5.2 Fotografie prototypu



Obrázek 24 fotografie prototypu 1



Obrázek 25 fotografie prototypu 2