

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ
ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Řídicí systém pro vytápění elektrické pece

**Vedoucí práce: Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.
Autor: Bc. Martin Gába**

2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin GÁBA**
Osobní číslo: **E12N0083P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Řídicí systém pro vytápění elektrické pece**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Navrhněte systém umožňující nastavit různé teplotní profily pro natápění elektrické pece.
2. Navrhněte vhodný algoritmus pro regulaci teploty.
3. Navržené řešení realizujte a zhodnoťte jeho vlastnosti.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

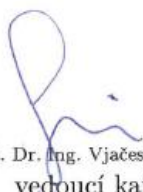
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Kamil Kosturik, Ph.D.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na možnosti regulace teploty a technické řešení regulátoru teploty vysokoteplotní tavné pece. Cílem práce je návrh systému umožňující nastavit různé teplotní profily, návrh vhodného algoritmu a následná realizace tohoto regulátoru. Hlavními body práce je teoretické zpracování informací o této problematice, jako jsou regulační systémy, senzory teploty a způsoby ohřevu. Dalším bodem je navrhnutí regulačního systému, výběr vhodného regulátoru a jeho realizace. Pro realizaci řídicího systému byl použit mikroprocesor STM32F407VTG6 od firmy STMicroelectronics. V práci je dále uveden kompletní hardwarový návrh a ukázky důležitých částí programu pro mikroprocesor.

Klíčová slova

Elektrická pec, řídicí systém, regulace, termočlánek, měření teploty, ARM

Abstract

The submitted diploma thesis is focused on possibilities of temperature regulation and technical solutions of a temperature controller for high-temperature electric furnace. The goals of the thesis were to design a system enabling to set various temperature profiles, to design an appropriate algorithm and realization of the controller. The first point of the work is theoretical information processing about the issues such as control systems, temperature sensors and heating methods. Other points are to propose a regulatory system, the selection of a suitable controller and its implementation. For the realization of the control system was used microprocessor STM32F407VTG6 by STMicroelectronics Company.

This thesis is divided into parts with each part focusing on the particular topic. The first chapter “Introduction” sets goals of this thesis. The second chapter “Electric-heating devices” outlines the theoretical elaboration of problems such as control systems, temperature sensors and heating methods. The third chapter entitled “Technical solution” deals with the major components and controller design. The fourth chapter entitled “Software solution” shows and explains the program for the microcontroller. The fifth chapter entitled “Profile settings” shows and explains the settings temperature profiles for heating electric furnace. The sixth chapter provides evaluation of the entire work.

Key words

Electric furnace, control system, regulation, thermocouple, temperature, ARM

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 8.5.2014

Martin Gába

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilu Kosturikovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Obsah

OBSAH.....	8
1 ÚVOD	9
2 ELEKTROTEPELNÁ ZAŘÍZENÍ.....	13
2.1 ODPOROVÝ OHŘEV	13
2.1.1 Přímý odporový ohřev.....	14
2.1.2 Nepřímý odporový ohřev.....	14
2.2 PŘENOS TEPLA	15
2.3 SENZORY TEPLoty	16
2.3.1 Odporové kovové senzory teploty	19
2.3.2 Termoelektrické senzory teploty	21
2.3.3 Srovnání termoelektrických a elektrických odporových senzorů	23
2.4 REGULAČNÍ SYSTÉMY.....	24
2.4.1 Nespojité regulace	25
2.4.2 Spojité regulace	27
3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ PRÁCE.....	31
3.1 POPIS PECE.....	31
3.2 NÁVRH SYSTÉMU	33
3.2.1 Intuitivní představa o problému	33
3.2.2 Upřesnění intuitivních představ.....	34
3.2.3 Výběr metody regulace.....	37
3.2.4 Reléová regulace.....	38
3.2.5 PID – reléová regulace	40
3.3 POUŽITÉ KOMPONENTY	42
3.3.1 Mikroprocesor STM32F4.....	42
3.3.2 LCD - 3.2“ TFT Display Module HY32C	45
3.3.3 Zesilovač termoelektrického napětí AD597	45
3.3.4 Teplotní senzor Ds18b20.....	47
3.3.5 Spínání výkonové zátěže	47
3.4 NÁVRH DPS.....	48
4 PROGRAMOVÉ ŘEŠENÍ PRÁCE.....	50
4.1 NASTAVENÍ MCU	52
4.1.1 Inicializace	52
4.1.2 Čítače/časovače	52
4.2 VÝPOČET PERIODY	54
4.3 RELÉOVÝ REGULÁTOR.....	55
4.4 PID REGULÁTOR	56
5 NASTAVENÍ PROFILŮ	58
6 ZÁVĚR	61
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63
SEZNAM PŘÍLOH.....	1
PŘÍLOHY	3

1 Úvod

Cílem této diplomové práce je seznámit se s možnostmi měření a regulace teploty vysokoteplotní laboratorní pece. Do této problematiky můžeme zahrnout srovnání komerčně vyráběných pecí, dostupných teplotních senzorů a porovnání standardních regulačních systémů. Na základě získaných informací vytvořit návrh vhodného algoritmu pro regulační systém s možnostmi nastavení teplotních profilů a nakonec provést realizaci regulačního systému. Hotové zařízení bude fungovat jako regulační systém pro předloženou laboratorní pec.

Celá práce je rozdělena do jednotlivých skupin dle obsahu. Ve druhé kapitole nazvané „Elektrotepelná zařízení“ je nastíněna teoretická problematika odporového ohřevu, způsobu měření teploty a použití standardních regulačních systémů pro elektrické laboratorní pece. Mezi zajímavé části bych zařadil podkapitoly „Termoelektrické senzory teploty“ a „Regulační systémy“. V podkapitole „Termoelektrické senzory teploty“ je popsána problematika termočlánků a výběru vhodného typu. A v podkapitole „Regulační systémy“ jsou popsány typy standardně používaných regulátorů. Kapitola třetí nazvaná „Technické řešení práce“ se zabývá popisem regulované pece, návrhem regulačního systému a návrhem dílčích komponentů. V kapitole čtvrté nazvané „Programové řešení práce“ je uveden a vysvětlen program pro mikropočítač. Kapitola pátá nazvaná „Nastavení profilů“ se zabývá uživatelským prostředím a způsobem nastavení teplotních profilů v regulačním systému. Poslední šestá kapitola se zabývá celkovým zhodnocením této práce.

Seznam symbolů a zkratk

<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
<i>P</i>	<i>Proporcionální</i>
<i>I</i>	<i>Integrační</i>
<i>D</i>	<i>Derivační</i>
<i>PI</i>	<i>Proporcionálně Integrační</i>
<i>PID</i>	<i>Proporcionálně Integračně Derivační</i>
<i>A/D</i>	<i>Analogově/Digitální</i>
<i>D/A</i>	<i>Digitálně/Analogový</i>
<i>ČSN</i>	<i>Česká Státní Norma</i>
<i>PP</i>	<i>Pásmo Proporcionality</i>
<i>LCD</i>	<i>Liquid-Crystal Display</i>
<i>ARM</i>	<i>Advanced RISC Machine</i>
<i>RISC</i>	<i>Reduced Instruction Set Computing</i>
<i>STM</i>	<i>STMicroelectronics</i>
<i>RTC</i>	<i>Real- Time Clock</i>
<i>SPI</i>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<i>CAN</i>	<i>Controller Area Network</i>
<i>UART</i>	<i>Universal Asynchronous Receiver and Transmitter</i>
<i>USART</i>	<i>Universal Synchronous Receiver and Transmitter</i>
<i>SDIO</i>	<i>Secure Digital Input Output</i>
<i>TFT</i>	<i>Thin Film Transistor</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i>
<i>SMD</i>	<i>Surface Mount Technology</i>
<i>GUI</i>	<i>Graphical User Interface</i>
<i>SWD</i>	<i>Serial Wire Debug</i>

Seznam obrázků

- Obr 2.1 Přímý odporový ohřev pevného materiálu (převzato z [1])
- Obr 2.2 Komorová pec pohled z boku (převzato z [1])
- Obr 2.3 Konstrukční uspořádání termočlánku (převzato z [5])
- Obr 2.4 Měřicí řetězec s termoelektrickým článkem (převzato z [5])
- Obr 2.5 Funkční schéma regulátoru (převzato z [7])
- Obr 3.1 Vnitřní uspořádání pece
- Obr 3.2 Představa o struktuře
- Obr 3.3 Strukturální schéma reléového regulátoru
- Obr 3.4 Průběh spínání topných článků
- Obr 3.5 Strukturální schéma PID – reléového regulátoru
- Obr 3.6 Vnitřní struktura PID regulátoru
- Obr 3.7 Blokové schéma navrhovaného systému
- Obr 3.8 Vývojový modul STM32F407 Discovery (převzato z [10])
- Obr 3.9 Blokové schéma mikroprocesoru STM32F407 (převzato z [11])
- Obr 3.10 Připojení LCD displeje
- Obr 3.11 Obvod AD597 – vnitřní struktura (převzato z [12])
- Obr 3.12 Obvod AD597 – zapojení
- Obr 3.13 Připojení senzoru DS18B20
- Obr 3.14 Vnitřní struktura relé (převzato z [13])
- Obr 3.15 Spínání polovodičového relé
- Obr 4.1 Vývojový diagram programu
- Obr 5.1 Displej – zobrazení

Seznam grafů

- Graf 2.1 Princip práce dvoupolohového regulátoru s necitlivostí (převzato z [7])
- Graf 2.2 Průběh dvoustavové regulace elektrotepelné pece
- Graf 3.1 Představa o průběhu
- Graf 3.2 Změřená přechodová charakteristika
- Graf 3.3 Přechodová charakteristika s vyznačenou dobou náběhu a průtahu (převzato z [8])
- Graf 3.4 Přechodová charakteristika – získání hodnot pro výpočty (převzato z [8])
- Graf 3.5 Simulace vypočtené přechodové funkce
- Graf 3.6 Rozdělení funkcí regulátoru

Seznam tabulek

- Tab 2.1 Tabulka materiálů pro odporové teploměry (převzato z [4])
- Tab 2.2 Tabulka materiálů pro termočlánky (převzato z [5])
- Tab 2.3 Porovnání odporových a termoelektrických teploměrů (převzato z [5])
- Tab 3.1 Parametry pece Nabertherm L 9/R udávané výrobcem
- Tab 3.2 Tabulka poměrů časových konstant (převzato z [8])

Seznam vztahů

- (2.1) *Joulovy ztráty (převzato z [1])*
- (2.2) *Účinnost Carnotova cyklu (převzato z [5])*
- (2.3) *Vratný Carnotův cyklus (převzato z [5])*
- (2.4) *Přepočítání Kelvynovy stupnice na Celsiovu (převzato z [5])*
- (2.5) *Přepočítání Kelvynovy stupnice na Fahrenheitovu (převzato z [5])*
- (2.6) *Přepočítání Kelvynovy stupnice na Réumurovu (převzato z [5])*
- (2.7) *Konduktivita (převzato z [5])*
- (2.8) *Odpor provozního odporového senzoru (převzato z [5])*
- (2.9) *Redukovaný odpor (převzato z [5])*
- (2.10) *Teplotní závislost odporu (převzato z [4])*
- (2.11) *Velikost termoelektrického napětí (převzato z [6])*
- (2.12) *Funkce ústředního členu PID regulátoru (převzato z [7])*
- (2.13) *Funkce ústředního členu PID regulátoru s interací (převzato z [7])*
- (2.14) *Pásmo proporcionality (převzato z [7])*
- (2.15) *Funkce ústředního členu P regulátoru (převzato z [7])*
- (2.16) *Frekvenční přenos ústředního členu P regulátoru (převzato z [7])*
- (2.17) *Funkce ústředního členu PI regulátoru (převzato z [7])*
- (2.18) *Frekvenční přenos ústředního členu PI regulátoru (převzato z [7])*
- (2.19) *Funkce ústředního členu PID regulátoru (převzato z [7])*
- (2.20) *Frekvenční přenos ústředního členu PID regulátoru (převzato z [7])*
- (3.1) *Výpočet volby soustavy (převzato z [8])*
- (3.2) *Přenos soustavy 2. Řádu (převzato z [8])*
- (3.3) *Výpočet časových konstant (převzato z [8])*
- (3.4) *Výpočet časového okamžiku t_2 (převzato z [8])*
- (3.5) *Výpočet poměru časových konstant (převzato z [8])*
- (3.6) *Přenosová funkce regulované soustavy (převzato z [8])*
- (3.7) *Tvar přenosové funkce (převzato z [14])*
- (3.8) *Přenos PID regulátoru (převzato z [14])*
- (3.9) *Přenos systému po uzavření zpětné vazby (převzato z [14])*
- (3.10) *Výpočet UpdateEvent (převzato z [9])*
- (3.11) *Přepočítání frekvence na čas (převzato z [9])*

2 Elektrotepelná zařízení

Objev elektrické energie znamenal pro celý svět vstup do 2. vědeckotechnické revoluce a umožnil další vývoj lidstva po všech stránkách. Objev vlivu elektrického proudu na ohřev vodiče na sebe nenechal dlouho čekat a dal vznik prvních elektrotepelných zařízení. Mezi první elektrotepelná zařízení patřila poměrně jednoduchá odporová a oblouková zařízení. Postupem času bylo snahou vytvářet dokonalejší zařízení, která by efektivněji přeměňovala elektrickou energii na tepelnou. Dnes se této problematice klade velký význam. S rostoucími nároky na kvalitu a čistotu materiálů se zvyšují i nároky na technologii, jejich výrobu a zpracování. Vznikl rozsáhlý vědní obor se širokou tematikou. Rozsáhlost tohoto oboru je zřetelná již v rozdělení elektrotepelných zařízení dle přeměny elektrické energie na teplo:

- a) *Odporová zařízení*
- b) *Indukční zařízení*
- c) *Oblouková zařízení*
- d) *Plazmová zařízení*
- e) *Elektronová zařízení*
- f) *Laserová zařízení*

Elektrické pece mají oproti pecím palivovým několik výhod, kvůli kterým pozvolna začaly vytlačovat pece na tuhá paliva z průmyslu. Jednou z hlavních výhod je, že v elektrických pecích nevznikají žádné zplodiny, které by mohly znečišťovat vsázku (tavený materiál). Dalšími výhodami jsou, že se v elektrotepelných zařízeních může dosáhnout vyšších teplot a přesnější regulace požadované teploty pro určité materiály.

S vývojem těchto pecí musel postupovat i vývoj v regulační technice, senzorech a akčních členech, na jejichž principu jsou postavena moderní elektrotepelná zařízení.

2.1 Odporový ohřev

Odporový ohřev a tepelné účinky elektrického proudu při průchodu vodičem byly známy již na konci osmnáctého století. Vývojem doby a na základě nových objevů v oboru elektrotechniky bylo zjištěno, že vodič, kterým prochází elektrický proud, se zahřívá. Tento jev lze vysvětlit Joulovým zákonem – Prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká teplo ve vodiči. Množství tepla (Joulovy ztráty) je přímo úměrné druhé mocnině proudu, elektrického odporu R v čase t . Lze vyjádřit rovnicí:

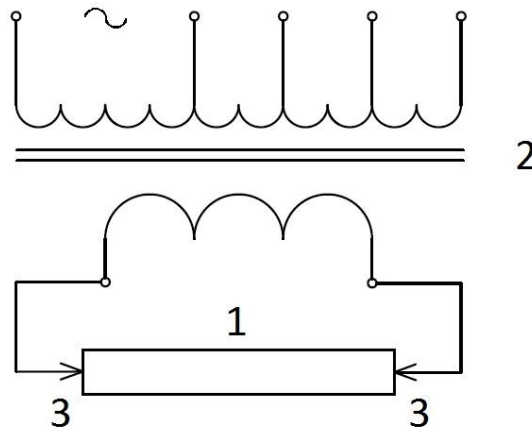
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad (2.1)$$

Podle způsobu vzniku tepla a jeho působení lze odporová zařízení rozdělit na dvě základní skupiny a to: [1]

- a) *Přímý odporový ohřev*
- b) *Nepřímý odporový ohřev*

2.1.1 Přímý odporový ohřev

Přímý odporový ohřev je speciálním způsobem ohřevu, kde teplo nevzniká průchodem elektrického proudu topným článkem, ale průchodem elektrického proudu přes pevnou elektricky vodivou vsázku nebo vodivou kapalinu (elektrolyt) obklopující vsázku. Mezi takové kapaliny patří solné lázně, kde jako elektrolyt slouží roztavené soli, které se průchodem proudu zahřívají. Pro příklad pevného materiálu lze uvést průchod značného elektrického proudu přes kovovou tyč. Dochází k prohřívání této tyče až na teplotu vhodnou pro další zpracování, například kování, kalení nebo žihání.



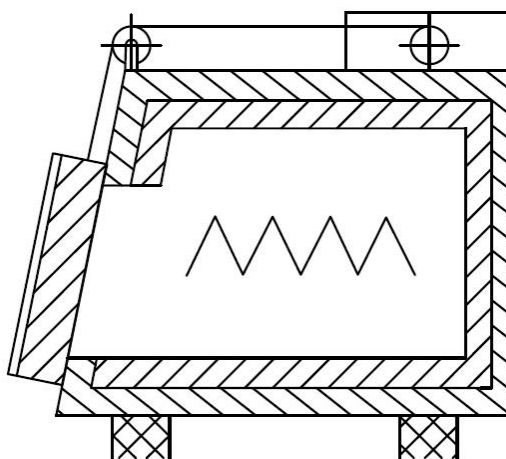
Obr 2.1 Přímý odporový ohřev pevného materiálu (převzato z [1])

Princip ohřevu kovové tyče je na obr 2.1. Hlavním požadavkem je, že délka ohřívané tyče musí být mnohonásobně delší, než je její průměr. Toto pravidlo je z důvodu rovnoměrného ohřevu materiálu po celé délce. Na obrázku je do tyče 1 z regulačního transformátoru 2 přiváděn skrze kontakty 3 velký proud. Ohřev materiálu je velmi účinný a rychlý. [1]

2.1.2 Nepřímý odporový ohřev

Nepřímý odporový ohřev není založen na principu průchodu elektrického proudu ohříváním tělesem. Teplo vzniká v topných člancích umístěných přímo v prostoru pece. Pece pro nepřímý odporový ohřev mají převážně vsázku ve tvaru hranolu nebo válce z důvodu rychlého a rovnoměrného rozložení tepla. Přímo v prostoru pece, nebo na stěnách vsázky jsou umístěny topné články vinuté zpravidla z odporového drátu. Z těchto topných článků se pak

teplo přenáší do prostoru pece převážně sáláním a prouděním atmosféry v pecním prostoru.[1]



Obr 2.2 Komorová pec pohled z boku (převzato z [1])

Elektrická odporová zařízení s přímým ohřevem se dle normy ČSN 34 5191 dělí podle několika hledisek.

Podle teploty na: [1]

- a) Nízkoteplotní do 600 °C
- b) Středoteplotní od 600 °C do 1100 °C
- c) Vysokoteplotní nad 1100 °C

Podle použití v provozu na:

- a) Pro tepelné zpracování kovů
- b) Pro tavení kovů
- c) Pro tavení skla
- d) Pro chlazení skla
- e) Pro laboratoře

2.2 Přenos tepla

Základní vlastností přenosu tepla je, že teplo se šíří vždy z místa s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Toto šíření můžeme popsat třemi způsoby a to buď působením jich samotnými, nebo nejčastěji jejich různými kombinacemi. [2]

Základní způsoby šíření tepla: [2]

- a) Vedením (kondukcí), zpravidla v tělesech tuhých
- b) Prouděním (konvekcí), v prostředí kapalném nebo plynném
- c) Sáláním (zářením, radiací), v průzračném prostředí

Teplu se prakticky nešíří pouze jedním principem, ale složením dvou až tří principů současně. Množství tepla, které je vsázka schopna přijmout v určitém čase je závislá na mnoha faktorech, jako jsou kvalita obložení vsázky, rychlost proudícího vzduchu, momentální změna teploty zářiče uloženého ve vsázce a další. Obecně můžeme předpokládat, že při nízkých teplotách převládá šíření tepla vedením a prouděním. Při teplotách vyšších nad 500 °C převládá přenos sáláním.

Šíření tepla vedením je jediný způsob, kterým je možné šířit teplo v pevných tělesech. Podmínkou tohoto šíření je, že pevná tělesa mezi kterými se šíří teplo musí mít rozdílné teploty. Tato podmínka vyplývá ze základní vlastnosti přenosu tepla, že teplo se šíří vždy z místa s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Při vedení tepla dochází k předávání pohybové energie mezi částicemi s vyšší střední kinetickou energií a částicemi s nižší kinetickou energií prostřednictvím vzájemných srážek. Dochází pouze ke kmitání kolem svých rovnovážných poloh. Podle rychlosti vedení tepla můžeme dělit látky na: [2]

- a) *Tepelné vodiče*
- b) *Tepelné izolanty*

Šíření tepla prouděním je možné pouze v látkách, kde se částice volně pohybují. Dochází k proudění hmoty o různé teplotě. Šíření tepla prouděním je možné tedy jen u kapalin a plynů. U pevných látek šíření tepla prouděním nelze provést. K přenosu tepla dochází vzájemným pohybem jednotlivých částí hmoty s odlišnou teplotou a vnitřní hustotou.

Šíření tepla sáláním (zářením) tepelných paprsků může nastat pouze v průzračném prostředí. Po dosažení teploty nad 500 °C můžeme v prostoru pece pozorovat pouze šíření tepla sáláním. Zbylé dva způsoby šíření tepla vedením a prouděním můžeme zanedbat. Princip tohoto šíření tepla lze vysvětlit tak, že každé těleso s vyšší teplotou než je absolutní nula, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii, ale také současně přijímá energii vyzařovanou tělesy jinými. Nakonec je zářivá energie pohlcena tělesy neprůzračnými a dochází ke změně energie na tepelnou. [2]

2.3 Senzory teploty

Regulace a kontrola teploty patří mezi nejdůležitější úkoly v průmyslu a automatizační technice. Mnoho technologických postupů při výrobě materiálů je závislých na dodržení přesně stanovených teplot (žihání, kalení, tavení). Tyto teploty se mohou pohybovat v rozmezí několika až řádově tisíců stupňů. Z toho velkého rozsahu plyne, že ne každý senzor teploty se může použít, proto je třeba pečlivě vybírat s ohledem na jeho životnost, přesnost, pracovní prostředí, výstupní signál pro následné zpracování řídicími obvody. Tato kapitola se

bude zabývat základní definicí teploty, rozdělením tepelných senzorů a nakonec popisem nejpoužívanějších senzorů aplikovaných v elektrotepelných zařízeních.

Pojem teplota

Teplota je stavovou veličinou charakterizující termodynamickou rovnováhu systému definované na základě účinnosti druhé věty termodynamické (Carnotova cyklu). Jinak řečeno účinnost vratných Carnotových cyklů pracujících mezi stejnými lázněmi s danými dvěma teplotami $T_1 < T_2$ je shodná. Z toho plyne, že je tedy nezávislá na jakýchkoliv vnitřních či vnějších jevech nebo na pracovní látce. Účinnost je tedy závislá pouze na teplotách těchto lázní. Z obecných úvah lze pak napsat, že platí vztah 2.2. [5]

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2.2)$$

kde :

- η je účinnost cyklu
- Q_2 je odebrané teplo teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_2
- Q_1 je odebrané teplo teploměrnou látkou z lázně s teplotou T_1

Z tohoto vztahu pak vyplývá, že poměr dvou termodynamických teplot je rovný poměru tepla odevzdaného chladiči a tepla přijatého od ohřívače při vratném Carnotově cyklu pracujícím mezi těmito dvěma teplotami. [5]

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2.3)$$

Na základě poznatků termodynamiky o účinnosti tepelných strojů zavedl Skotský fyzik W. Thomson (lord Kelvin) tzv. termodynamickou teplotní stupnici. Teplotní stupnice je definována na základě trojného bodu vody, tj. na základě rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a syté vodní páry). Základní jednotkou termodynamické teploty je K (kelvin). Teplota trojného bodu byla pevně stanovena na hodnotu $T = 273,16$ K. Dle Kelvinovy stupnice máme definované další teplotní stupnice jako Celsiova, Fahrenheitova nebo Réaumurova. [5]

Přepočtní vztahy:

$$\text{Celsiova stupnice} \quad C = K - 273,15 \quad (2.4)$$

$$\text{Fahrenheitova stupnice} \quad F = \frac{9K}{5} - 459,67 \quad (2.5)$$

$$\text{Réaumurova stupnice} \quad R = \frac{4(K-273,15)}{5} \quad (2.6)$$

Pro měření teploty využíváme takzvané senzory teploty. Tyto senzory můžeme rozdělit podle způsobu měření na dotykové a bezdotykové. [5]

Senzory pro dotykové měření teploty:

1) Elektrické

- a) *Odporové kovové*
- b) *Odporové polovodičové*
- c) *Polovodičové s PN přechodem*
- d) *Termoelektrické*
- e) *Krystalové*

2) Dilatační

- a) *Kapalinové*
- b) *Plynové*
- c) *Parní*
- d) *Bimetalové*

3) Speciální

- a) *Akustické*
- b) *Šumové*
- c) *Magnetické*
- d) *Tekuté krystaly*

Senzory pro bezdotykové měření teploty:

- 1) *Tepelné*
- 2) *Kvantové*

U průmyslových pecí se setkáváme nejčastěji se senzory teploty elektrickými. To znamená, že se ve snímači převádí teplota na elektrickou veličinu (napětí, odpor), která je vyhodnocena elektronickým obvodem a převedena na teplotní údaj. Proto se dále budeme zabývat nepoužívanějšími elektrickými senzory v elektrotepelných zařízeních a to odporovými kovovými a termoelektrickými.

2.3.1 Odporové kovové senzory teploty

Základním principem elektrických kovových teploměrů je teplotní závislost odporu na teplotě. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v krystalové mřížce. S rostoucí teplotou tyto ionty zvyšují amplitudu svých kmitů a kladou tak větší odpor průchodu elektronů. Pro konduktivitu kovu platí: [5]

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m} \quad (2.7)$$

<i>Kde</i>	σ	<i>je konduktivita</i>
	n	<i>počet elektronů v jednotkovém objemu</i>
	e	<i>elementární náboj</i>
	τ	<i>relaxační čas elektronů</i>
	m	<i>hmotnost nosiče náboje</i>

Toto je zjednodušená představa závislosti odporu kovů na teplotě, která je principem funkce odporových kovových senzorů. Pro provozní kovové teploměry lze v rozsahu teplot 0 °C až 100 °C použít vztah: [5]

$$R = R_0(1 + \alpha\vartheta) \quad (2.8)$$

<i>Kde</i>	α	<i>teplotní součinitel odporu</i>
	R_0	<i>odpor teploměru při 0 °C</i>

Pro vyšší teplotní rozsahy neplatí tato rovnice, ale rovnice nelineární v závislosti na použitém kovu. Nejpoužívanějšími materiály pro odporové kovové teploměry je platina (Pt). Kromě platiny se také používá nikl, měď, molybden a pro extrémně nízké teploty slitiny Rh-Fe a Pt-Co. Hlavními přednostmi elektrických odporových teploměrů je jejich dlouhodobá stabilita, která je dána vlastnostmi použitých materiálů. [5]

Platinový odporový teploměr

Platina se vyznačuje chemickou nečinností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání. Z tohoto důvodu se platinový teploměr stal jedním z nejpoužívanějších odporových teploměrů v průmyslu. Velkou výhodou oproti ostatním senzorům teploty je přesně stanovený odpor čisté platiny v celém intervalu měřených hodnot. Ten se vlivem časové stálosti platiny téměř nemění. Další výhodou je závislost napětí na teplotě nejbližší k linearitě. [5]

Základní konstrukční část teploměru tvoří měřicí odpor, který se vyrábí:

- a) Drátovou technologií
- b) Tenkovrstvou technologií
- c) Tlustovrstvou technologií

Drátový měřicí odpor je tvořen spirálově stočeným tenkým drátkem (průměr od 0,01 mm až 0,05 mm) zataveným do keramického nebo skleněného těla. Z důvodu teplotní délkové roztažnosti platiny ($9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) odlišné od teplotní roztažnosti nosného materiálu (keramiky, skla, kysličníku hlinitého), dochází k systematické chybě způsobené relativními délkovými roztažnostmi obou materiálů. Tato chyba dosahuje při teplotách nad $400 \text{ }^\circ\text{C}$ až $\pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$. Největší stability dosáhneme volným uložením platinové cívky ve vzduchu, nebo ve směsi helia a kyslíku. [5]

Při tenkovrstvé technologii je platinový odpor vytvořen na ploché korundové destičce technikou napařování a iontového leptání. Tyto odpory mají rychlejší odezvu než odpory drátové, vyznačují se vyšším odporem a jsou levnější. Drátové odpory jsou však kvalitnější a časově stálejší. [4]

Hlavním parametrem určujícím čistotu platiny je takzvaný redukovaný odpor $W_{100 \text{ }^\circ\text{C}}$, který je dán poměrem odporů senzoru při $100 \text{ }^\circ\text{C}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$: [5]

$$W_{100 \text{ }^\circ\text{C}} = \frac{R_{100 \text{ }^\circ\text{C}}}{R_{0 \text{ }^\circ\text{C}}} \geq 1,385 \quad (2.9)$$

U provozních teploměrů využívajících se v praxi je důležitá záměnnost, která umožňuje v určitých mezích měřit s chybami. Z důvodu snadné výměny a záměnnosti jsou normami určeny hodnoty odporů včetně odchylek. Dle IEC (International Electrotechnical Commission) se platinové měřicí odpory ($W_{100} = 1,385$) dělí do dvou tolerančních tříd: [4]

- 1) Třída A: Rozsah teplot: $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ až $650 \text{ }^\circ\text{C}$, tolerance ($^\circ\text{C}$): $\pm (0,15 + 0,002 \cdot |t|)$
- 2) Třída B: Rozsah teplot: $-200 \text{ }^\circ\text{C}$ až $850 \text{ }^\circ\text{C}$, tolerance ($^\circ\text{C}$): $\pm (0,3 + 0,005 \cdot |t|)$

V praxi se nejčastěji setkáme s platinovými senzory, jejichž hodnota odporu je $100 \ \Omega$ označované jako Pt100. Kromě této hodnoty se můžeme setkat i s Pt senzory 50, 200, 500, a $2000 \ \Omega$. Pro teplotní závislost standardního měřicího odporu ($W_{100} = 1,385$, $R_0 = 100 \ \Omega$) platí vztah: [4]

$$W_{100} = R_0 [1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3(\vartheta - 100)] \quad (2.10)$$

Přičemž dle IEC je $A = 3,90802 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = -5,802 \times 10^{-7} \text{ K}^{-2}$ a $C = -4,27350 \times 10^{-12}$

pro $J < 0$ °C, resp. $C=0$ pro $J > 0$ °C.

Tabulka materiálů používaných pro odporové teploměry:

Materiál čidla	Základní odpor $R_0[\Omega]$	Poměr odporů W_{100}	Měřicí rozsah [°C]	Teplotní součinitel odporu $a \cdot 10^{-3} [K^{-1}]$
Platina	100	1,3850	-200 až 1000	3,85 až 3,93
Měď	100	1,6180	-60 až 250	6,17 až 6,70
Nikl	100	1,4260	-200 až 200	4,26 až 4,33

Tab 2.1 Tabulka materiálů pro odporové teploměry (převzato z [4])

V tabulce jsou uvedeny základní typy materiálů a rozsahů. Kromě nich se vyrábějí též senzory do teploty 1100 °C.

Z konstrukčního hlediska se odporové senzory vyrábějí se dvěma nebo čtyřmi vývody. Odpor těchto vývodů se přičítá s odporu vlastního senzoru a vzniká tak proměnná chyba. [4]

2.3.2 Termoelektrické senzory teploty

Termočlánky patří mezi velmi rozšířené metody pro měření teplot s velmi širokými tepelnými intervaly a jsou často používány pro svou jednoduchost, tepelnou odolnost a široký rozsah teplot. Vzhledem ke své malé hmotnosti a setrvačnosti jsou vhodné pro měření rychlých změn teploty.

Jejich funkce je založena na principu termoelektrického jevu (Seebeckova jevu), při kterém dochází k převodu teploty na elektrické napětí. Z teorie pohybu volných elektronů u kovů je známo, že na styku dvou materiálů různých kovů může vzniknout rozdíl potenciálů, jestliže jsou různé jejich výstupní práce. Z této definice vyplývá, že termoelektrické napětí je závislé na rozdílu teplot obou konců v místě styku (studeného a teplého konce). Velikost termoelektrického napětí můžeme určit ze vztahu: [6]

$$U_r = a + b\Delta\vartheta + c(\Delta\vartheta)^2 \quad (2.11)$$

Kde: U_r Termoelektrické napětí [V]
 a, b, c Konstanty závislé na použité dvojici kovů [-]
 $\Delta\vartheta$ Rozdíl teplot mezi oběma konci [K]

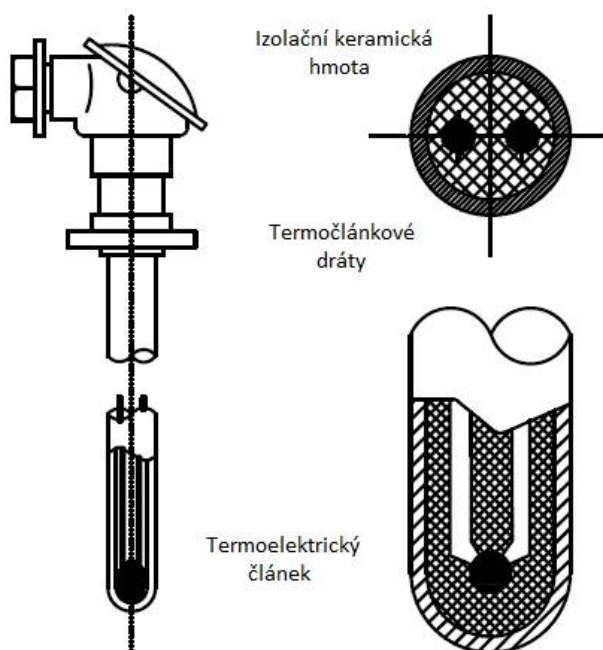
Výběrem materiálů použitých v bodě spojení termočlánku určujeme základní vlastnosti senzoru jako je linearita, teplotní rozsah, odolnost proti chemickým, mechanickým

a korozním vlivům. Teplotní rozsahy jednotlivých typů termočlánků jsou dány vlastní destruktivní teplotou použitých materiálů. Toto pravidlo platí i při výběru termočlánků do chemicky či mechanicky náročných prostředí. V technické praxi se používají pro nižší teploty dvojice kovů Fe-Ko (železo-konstantan, konstantan má složení 45 % Ni, 55 % Cu), Ch-A (chromal-alumel), Ch-K (chromal-kopel), NiCr-Ni a pro vyšší teploty PtRh-Pt, W-Re, W-Ir. Kromě kovových snímačů se dále používají snímače z nekovů, jako jsou grafit, karbid, křemík a bór. [6]

Nejpoužívanější páry materiálů (termoelektrické články) jsou ve světě normalizovány. Označení jednotlivých typů termočlánků se provádí dle doporučení IEC velkými písmeny. Tabulka nejčastěji používaných materiálů pro termoelektrické články: [5]

Termoelektrický článek	Teplotní interval [°C]	Citlivost ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)	Označení
Platina (6 - 30 %) / Rhodium	38 – 1800	7,7	B
Wolfram (5 - 26 %) / Rhenium	0 – 2300	16	C
Chrom - Konstantan	0 – 982	76	E
Železo - Konstantan	0 – 760	55	J
Chrom - Hliník	-184 – 1260	39	K
Platina (13 %) / Rhodium - Platina	0 – 1596	11,7	R
Platina (10 %) / Rhodium - Platina	0 – 1538	10,4	S
Měď - Konstantan	-184 – 400	45	T

Tab 2.2 Tabulka materiálů pro termočlánky (převzato z [5])

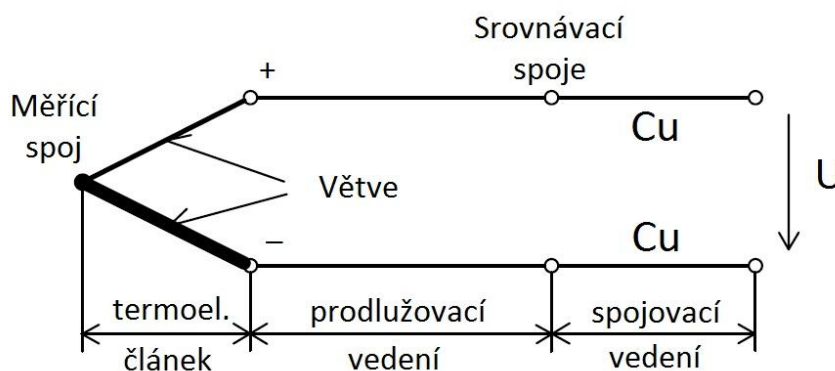


Obr 2.3 Konstrukční uspořádání termočláňku (převzato z [5])

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky: [5]

- a) Minimalizace vlivu kolísání srovnávacích teplot
- b) Minimalizace vlivu odporu přívodů k senzoru
- c) Potlačení rušivých signálů

Měřicí spoj termočlánku se skládá z takzvaného horkého a studeného konce. Výsledné termoelektrické napětí je dáno rozdílem napětí na horkém a studeném konci. Dodržíme-li stabilizaci studeného konce, bude termoelektrické napětí v měřeném bodě úměrné teplotě horkého konce. Teplota studeného konce bývá obvykle stabilizována na teplotu 0 °C, 20 °C, 25 °C, popřípadě 50 °C dle prostředí pomocí termostatickou či elektronickou kompenzací speciálními obvody. Pokud elektrické obvody pro zpracování termoelektrického napětí nejsou v těsné blízkosti místa měření, je nutné termoelektrický článek prodloužit takzvaným prodlužovacím vedením. Prodlužovací vedení prodlužuje oba konce termoelektrického článku až ke srovnávacím spojům. Toto vedení musí být zhotoveno ze stejných materiálů, jako je použitý termoelektrický článek, nebo z materiálů, které musí mít ve stanoveném teplotním rozmezí stejnou statickou charakteristiku jako samotný termoelektrický článek. Vliv kolísání teploty srovnávacích spojů je nepatrný. Závislost termoelektrického napětí termočlánku není lineární a proto se jako termočlánky vybírají z takových materiálů, které mají závislost termoelektrického napětí na teplotě co možná nejlineárnější. [5]



Obr 2.4 Měřicí řetězec s termoelektrickým článkem (převzato z [5])

2.3.3 Srovnání termoelektrických a elektrických odporových senzorů

Termoelektrické i odporové teploměry patří mezi nejpoužívanější snímače teploty používaných v průmyslu. Termoelektrické články jsou charakteristické svým univerzálním využitím pro velké rozsahy teplot v rozsahu -200 °C až 3000 °C v závislosti na použitém typu článku. Odporové teploměry lze využít v užším rozsahu teplot od -200 °C do 1000 °C, ale

zato nabízejí vyšší přesnost, teplotní a dlouhodobou stabilitu. Pro přesnější porovnání uvádím tabulku s hlavními parametry: [5]

Odporový teploměr	Parametr	Termoelektrický článek
Více přesné	<i>Přesnost</i>	Méně přesné
Užší (-200 °C až 1000 °C)	<i>Rozsah teplot</i>	Široký (-200 °C až 3000 °C)
Cca 3krát dražší	<i>Cena</i>	Levné
Pomalejší	<i>Rychlost odezvy</i>	Rychlé
Střední	<i>Velikost</i>	Malá
Malá	<i>Odolnost proti vibracím</i>	Velká
Nutné	<i>Napájení</i>	Není potřeba
Výborná	<i>Dlouhodobá stabilita</i>	Horší vlastnosti

Tab 2.3 Porovnání odporových a termoelektrických teploměrů (převzato z [5])

2.4 Regulační systémy

Pod pojmem regulace rozumíme tu část systému, která zajišťuje udržování technologické veličiny (regulované veličiny) na určité hodnotě, obvykle konstantní. Zařízení, které tuto funkci realizuje, označujeme regulátor (regulační systém). Pro dosažení správného návrhu obvodu a jeho parametrů je nutné znát základní vlastnosti regulované soustavy, jako je například její dynamické chování. Toto dynamické chování můžeme zjistit pomocí testovacích signálů přiváděných na vstup regulační soustavy a podle průběhu výstupu lze danou soustavu regulovat.

Typů regulátorů existuje celá řada, můžeme je však rozdělit na několik skupin: [7]

- **Podle Průběhu zpracovávaných veličin:**
 - a) *Spojité*
 - b) *Nespojité*
- **Podle způsobu popisu:**
 - a) *Lineární – Jsou popsány lineárními rovnicemi.*
 - b) *Nelineární – Jsou popsány nelineárními rovnicemi.*
- **Podle přívodu energie:**
 - a) *Přímé – Nepotřebují vnitřní zdroj, energii pro vlastní činnost získávají z řízené soustavy.*
 - b) *Nepřímé – Pro svou činnost potřebují vnější zdroj energie.*

- **Podle druhu signálu zpracovaného v regulátoru:**
 - a) *Elektrické*
 - b) *Pneumatické*
 - c) *Hydraulické*
 - d) *A jiné ...*

Za spojitě regulátory označujeme takové, u kterých je vstupní i výstupní signál spojitou funkcí času. To znamená, že vstup i výstup se může měnit v každém časovém okamžiku. Mezi takovéto regulátory řadíme veškeré, které pracují s analogovými hodnotami. U nespojitých regulátorů se vstupní, výstupní nebo obě veličiny mění v čase nespojitě. To znamená, že v určitém časovém okamžiku dochází ke skokové změně hodnoty na hodnotu jinou, která zůstává konstantní až do další skokové změny. Mezi takovéto regulátory řadíme veškeré, které pracují s číslicovým signálem. Postupem času a vývojem nových technologií zaznamenal vývoj regulátorů přechod od analogových, spojitě pracujících regulátorů k číslicovým, tedy nespojitým. Tento přechod byl umožněn častějším využitím počítačové techniky v řízení procesů. Avšak v souvislosti s tímto pokrokem vznikly některé nové problémy, jako je například převod analogových signálů na signály číslicové. Jak bylo zmíněno, dnešní regulátory pracují na principu nespojitých regulátorů, ale vzhledem ke krátkým časovým intervalům mezi regulačními zásahy se navenek jeví jako spojitě.

V průmyslové praxi převážně v řízení odporových pecí se nejčastěji využívá regulace dvoustavové, nebo regulace založené na principu proporcionálně integrační. [7]

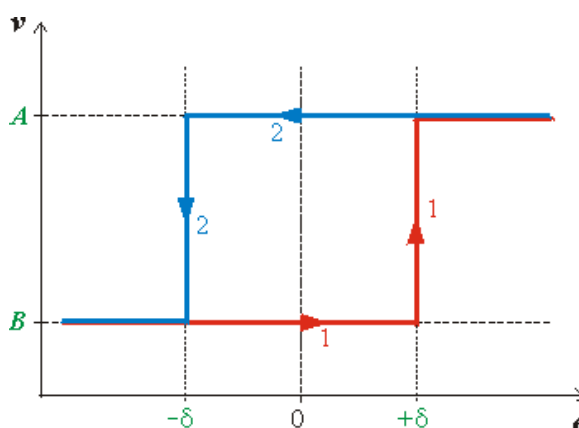
2.4.1 Nespojitá regulace

Jak bylo zmíněno výše, jedná se o regulátory, jejichž akční veličina se nemění spojitě, ale nabývá určitého omezeného počtu hodnot. To znamená, že výstupní veličina se v určitém časovém okamžiku mění skokově a zůstává v nezměněném stavu až do dalšího zásahu regulačního obvodu. Mezi takové regulátory řadíme veškeré, které pracují s číslicovým signálem nebo signálem spojitým navzorkovaným vhodným A/D převodníkem. U moderních regulačních systémů se využívá převážně nespojitě regulace z důvodu digitalizace. Velkou výhodou dnešních systémů je velké množství vzorkovaných signálů, takže výsledná regulace se navenek jeví jako spojitá.

Základní nespojitě regulátory jsou velmi rozšířené z důvodu jednoduché konstrukce a malých rozměrů. Nevýhodou je ale omezená jakost regulace. [7]

2.4.1.1 Dvoustavová regulace

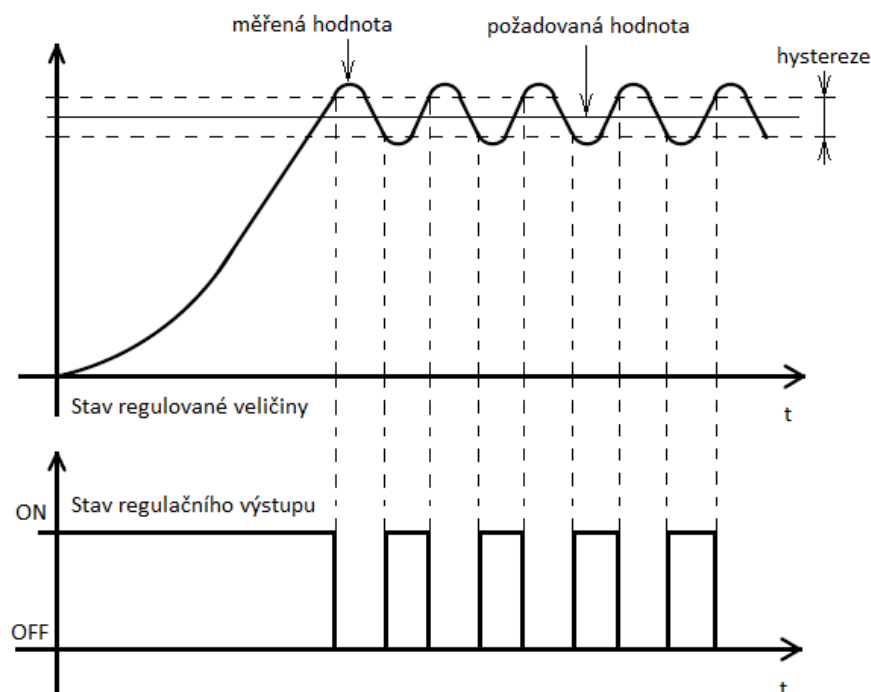
Dvoustavová regulace je jednou ze základních a nejpoužívanějších metod na řízení a regulaci teploty. Můžeme se s ní setkat u většiny domácích spotřebičů, u regulace hladin vody ve vodních nádržích nebo regulace chlazení. Akční člen je ovládán nespojitě, to znamená, že je nastavován na jednu ze dvou mezních hodnot. Výstup regulátoru bude přepínán mezi stavem zapnuto – vypnuto (otevřeno - zavřeno) vždy pokud měřená veličina překročí požadovanou hodnotu jakýmkoliv směrem. Z toho vyplývá, že dvoustavový regulátor musí být takzvaně necitlivý na změnu regulované veličiny v rozmezí $\pm \delta$ kolem požadované hodnoty. Tuto necitlivost označujeme jako hysterezi. Hysterezní okno $\pm \delta$ volíme vhodně veliké vzhledem k charakteru regulace, celkového zařízení a také s ohledem na životnost konkrétních akčních členů. Princip činnosti je znázorněn na obr 2.5. Pracovní polohy akčního členu jsou na obrázku označeny písmeny A a B. Pokud dojde k nárůstu regulační odchylky e dojde ke změně akční veličiny v podle červené čáry 1 a při poklesu podle modré čáry 2. V oblasti kolem bodu $e = 0$ ohraničeného hysterezi $\pm \delta$ regulátor zachovává předchozí hodnotu akční veličiny.



Graf 2.1 Princip práce dvoupolohového regulátoru s necitlivostí (převzato z [7])

Tento druh regulace je svou podstatou výjimečný, a v praxi velmi používaný. Hlavní využití nalezne u aplikací nevyžadující dokonalou přesnost řízení, u systémů kde není možné často vypínat a spínat přívod energie, nebo kde se regulovaná veličina mění velmi pomalu.

Dvoustavový regulátor najdeme skoro v každém regulátoru teploty (termostatu). U výkonových pecí s dlouhým doběhem regulované veličiny (teploty), musíme počítat s přeběhem hysterezního okna ve směru nahoru i dolu. Na grafu 2.1 můžeme vidět hypotetický průběh regulované teploty a akčních zásahů pro elektrotepelnou pec. Vzhledem k vysokému výkonu a setrvačnosti vlivem přenosu tepla popsaném výše, se tato regulace jeví jako vhodné řešení pro udržení teploty v předepsaných mezích. [7]

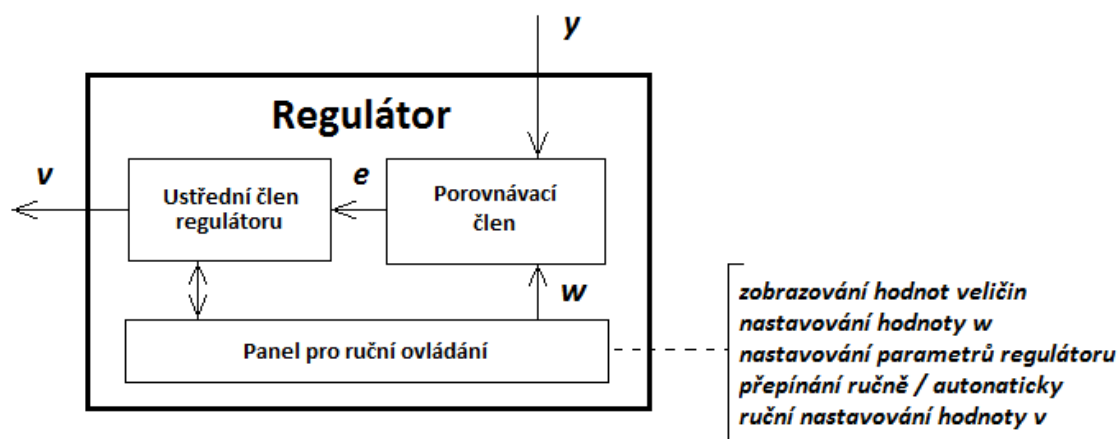


Graf 2.2 Průběh dvoustavové regulace elektrotepelné pece

2.4.2 Spojitá regulace

Jak bylo zmíněno, jedná se o regulátory, jejichž regulovaná veličina se mění spojitě v čase. Můžeme tedy tvrdit, že reagují na libovolně malé změny regulační odchylky, díky tomu dosahují vyšší jakosti regulace. Jsou však náročnější a nákladnější na provozní podmínky. Regulační vlastnosti spojitých regulátorů jsou velmi závislé na přenosových vlastnostech měnících se v závislosti na kmitočtu. Tyto kmitočtové vlastnosti lze určit pomocí frekvenční charakteristiky a vzhledem k vlastnostem soustavy nastavit vhodnou regulaci.

Na obr 2.6 je znázorněno obecné blokové schéma, které je základním prvkem pro každý moderní regulátor realizovaný jako samostatný prvek.



Obr 2.5 Funkční schéma regulátoru (převzato z [7])

Porovnávací (měřicí) člen – zajišťuje skutečnou naměřenou hodnotu regulované veličiny a porovnává ji s hodnotou zadanou manuálně z bloku ručního ovládání. Na výstupu vzniká takzvaná regulační odchylka.

Ústřední člen – zpracovává regulační odchylku danou porovnávacím členem a realizuje požadované vlastnosti celého regulačního obvodu. Parametry ústředního členu lze nastavit podle našich požadavků na regulaci. Výstupem ústředního členu je akční zásah.

Akční člen – odpovídajícím způsobem reaguje na akční zásah a působí na soustavu. Za akční člen můžeme považovat ventil, topný článek nebo motor.

y – reálná naměřená hodnota

w – hodnota řídicí veličiny

e – regulační odchylka dána vztahem $e = w - y$

v – akční zásah

Funkce ústředního členu je závislá na požadavcích na regulační obvod. Z tohoto důvodu bývá často přímo označován za regulátor. U běžně používaného spojitě pracujícího ústředního členu můžeme matematicky vyjádřit obecný tvar rovnice popisující jeho chování. Ve vzorci č. 2.12 je znázorněna funkce ústředního členu PID regulátoru.

$$v = r_0 \cdot e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \quad (2.12)$$

P I D

Z rovnice plyne, že ústřední člen je tedy tvořen třemi částmi definující jeho vlastnosti.

Proporcionální složkou P - určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky, r_0 je proporcionální konstanta (zesílení).

Integrační složkou I - určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky, r_{-1} je integrační konstanta regulátoru.

Derivační složkou D - určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky, r_1 je derivační konstanta regulátoru.

Takto popsaný ústřední člen regulačního obvodu vyhovuje většině aplikací spojitě regulace, ale z praktického a konstrukčního hlediska musel být upraven do tvaru:

$$v = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.13)$$

Takto matematicky popsaný regulátor se nazývá regulátor s interakcí, protože proporcionalní konstantou r_0 se násobí proporcionalní, integrační i derivační část rovnice. Konstanta T_i je takzvaná integrační konstanta času, konstanta T_d je takzvaná derivační konstanta času a konstanta r_0 je opět zesílení regulátoru často definované ze vztahu pásma proporcionality pp.

$$\frac{pp}{100} = \frac{1}{r_0} \quad (2.14)$$

Základní vlastnosti ústředního členu popsané výše lze v reálných regulačních obvodech kombinovat různými způsoby ve snaze dosáhnout co nejlepší funkce vzhledem k dané soustavě. V praxi se nejčastěji používají typy regulátorů P, PI a PID. [7]

2.4.2.1 P – regulátor

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších regulátorů spojitě regulace pro méně náročné aplikace. Ze vztahu 2.15 plyne, že zesiluje pouze regulační odchylku e a ze vztahu 2.16, že frekvenční přenos ideálního regulátoru je nezávislý na kmitočtu. Je vhodné ho použít v případě, kdy nám nevadí trvalá regulační odchylka a pro regulaci preferujeme jednoduché a levné řešení. [7]

$$v = r_0 \cdot e(t) \quad (2.15)$$

$$F_R(p) = r_0 \quad (2.16)$$

2.4.2.2 PI – regulátor

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších regulátorů spojitě regulace pro středně náročné aplikace. Zlepšuje vlastnosti P regulátoru přidáním integrační složky I regulátoru. Samostatný Integrační regulátor zhoršuje stabilitu regulace, ale při společné funkci proporcionalní a integrační složky se vlastnosti zlepšují. Při vhodném nastavení vykazuje i dobré vlastnosti z hlediska stability pro astatické soustavy. V průběhu regulačního pochodu zprvu převládá vliv Proporcionalní složky, s postupujícím časem začíná převládat vliv integrační složky. Je vhodné ho použít v případě, kdy vyžadujeme regulaci bez trvalé regulační odchylky. [7]

$$v = r_0 \cdot e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \quad \rightarrow \quad v = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau \right] \quad (2.17)$$

$$F_R(p) = r_0 + \frac{r_{-1}}{p} \quad \rightarrow \quad F_R(p) = r_0 \left[1 + \frac{1}{T_i p} \right] \quad (2.18)$$

2.4.2.3 PID - regulátor

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších regulátorů spojitě regulace pro náročné aplikace. Je schopný velmi dobře regulovat rychlé děje bez trvalé regulační odchylky. Řídicí algoritmus je založen na proporcionální, integrační a derivační složce. Vliv proporcionální a integrační složky byl vysvětlen v PI regulátoru, PID regulátoru je vylepšen derivační složkou, která se používá ke zvýšení rychlosti přenosu. Je vhodné ho použít v aplikacích, kde vyžadujeme rychlost a přesnost regulace, ale samozřejmě za vyšší cenu a obvodovou náročnost než tomu bylo u předchozích způsobů regulace. [7]

$$v = r_0 \cdot e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt} \rightarrow v = r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.19)$$

$$F_R(p) = r_0 + \frac{r_{-1}}{p} + r_1 p \quad \rightarrow \quad F_R(p) = r_0 \left[1 + \frac{1}{T_i p} + T_i p \right] \quad (2.20)$$

3 Technické řešení práce

Před samotným návrhem bylo nutné prostudovat všechny teoretické parametry, týkající se přenosu tepla, snímání tepla a používané regulace v zařízeních podobného typu. S nabytými znalostmi bylo možné zhodnotit vlastnosti použité pece a případně stanovit určitá vylepšení ve způsobu vytápění, nebo snímání teploty.

Na těchto získaných informacích je již možné postavit teoretický návrh regulačního zařízení. Tento návrh byl proveden nejprve jako rozvaha a blokové vyjádření celé soustavy. Po teoretické rozvaze bylo možné provést první výpočty a návrhy regulačního zařízení. Tyto kroky jsou popsány v podkapitolách Popis pece a Návrh systému. Dalším krokem v návrhu bylo ověření teoretických předpokladů praktickým měřením, při kterém jsme si mohli zkontrolovat naše úvahy a zvolit další kroky v návrhu. Těmito kroky je myšleno zvolení způsobu regulace na základě praktických měření, matematických výpočtů a simulací.

Po získání ucelené představy o problému a způsobu řešení bylo možné přistoupit k praktickému návrhu hardwaru. Tomuto návrhu je věnována podkapitola Použité komponenty, ve které se uvádí hlavní části systému a odůvodnění proč byly tyto komponenty použity a jaké bylo zvoleno jejich zapojení.

Jelikož se jedná o elektronické zařízení pracující v blízkosti rušivých polí, nemůžeme opomenout vliv těchto rušení. Je nutné navrhnout vhodná opatření chránící zařízení před vlivy vlastního spínání topných panelů i vlivy vnikající zvenčí.

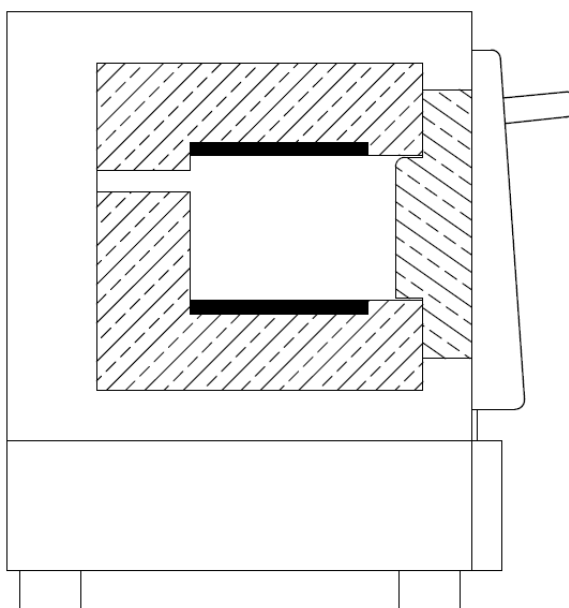
3.1 Popis pece

Řídicí systém je aplikován na laboratorní muflovou pec německého výrobce Nabertherm. Tento typ pecí je často používán v malých laboratořích pro tavení kovů, skla a vypalování keramiky. Typová specifikace L9/R označuje komorovou pec s objemem vnitřní komory 9 l. Jedná se o typ pece s nepřímým vytápěním, která je vytápěna ze dvou stran pomocí keramických topných těles s integrovaným topným drátem chráněným před spalinami. Tyto topné dráty jsou spínány pomocí elektronického relé, které umožňuje bezhlučné spínání s vyšší frekvencí, než tomu bylo u mechanických relé. Informace o aktuální teplotě uvnitř pece je zprostředkována pomocí termočlánku typu K, který je zapuštěn v zadní stěně chráněný keramickým pouzdem. Pec není vybavena žádným typem chlazení, pouze v zadní stěně je umístěn otvor pro odvětrání odpadního vzduchu. Maximální teplota uváděná výrobcem je 1100 °C. Z důvodu dosažení vysokých teplot a vysoké stability teploty jsou stěny pece tvořeny dvojitou izolací. Pec je napájena jednofázově 230 V a příkon topných těles je 2700 W. Rám pece je tvořen svařovanou ocelovou konstrukcí a venkovní stěny jsou

tvořeny ocelovými plechy. Přední dvířka jsou konstruována jako výklopná. Pod vlastní pecí se nachází prostor s vysunovacím boxem pro elektroniku. Konstrukční uspořádání je uvedeno na obrázku 3.1.

Výrobce	Nabertherm
Typové označení	L 9/R
Rok výroby	1992
Příkon [W]	2700
Napájecí napětí [V]	230
Objem [l]	9
Vnitřní rozměry [mm]	230/230/170
Vnější rozměry [mm]	480/550/570+290

Tab 3.1 Parametry pece Nabertherm L 9/R udávané výrobcem



Obr 3.1 Vnitřní uspořádání pece

3.2 Návrh systému

Při návrhu regulátoru a regulační soustavy bylo postupováno osvědčeným postupem. Prvním krokem je získání ucelené představy o problematice regulace elektrotepelných zařízení a konstrukčním řešení dané elektrické pece. Ze získaných informací je sestaven návrh regulační soustavy v blokovém uspořádání a na základě teoretických předpokladů je vytvořena představa o průběhu přechodové charakteristiky a funkce. Tyto kroky jsou popsány v podkapitole Intuitivní představa o problému.

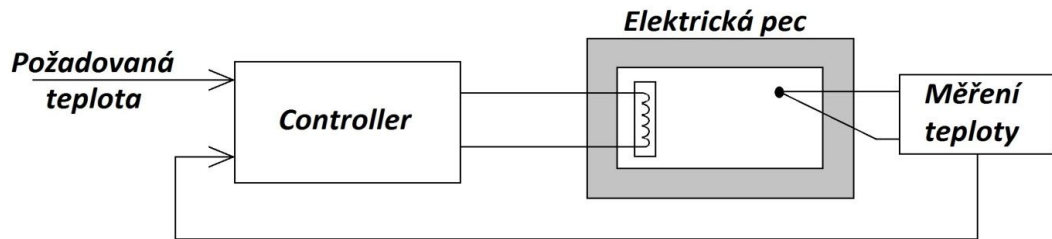
Dalším krokem při návrhu je ověření teoretických předpokladů praktickým měřením. Z naměřených hodnot je možné provést matematický odhad struktury řízeného systému. Z tohoto odhadu je možné určit parametry přenosové funkce. Tyto kroky jsou popsány v podkapitole Upřesnění intuitivních představ.

Následně po získání přenosové funkce je možné provést výběr regulačního členu a celé regulační soustavy. Kroky vedoucí k výběru regulační metody jsou uvedeny v podkapitole Výběr metody regulace a popis použitého řešení je popsán v dalších podkapitolách.

3.2.1 Intuitivní představa o problému

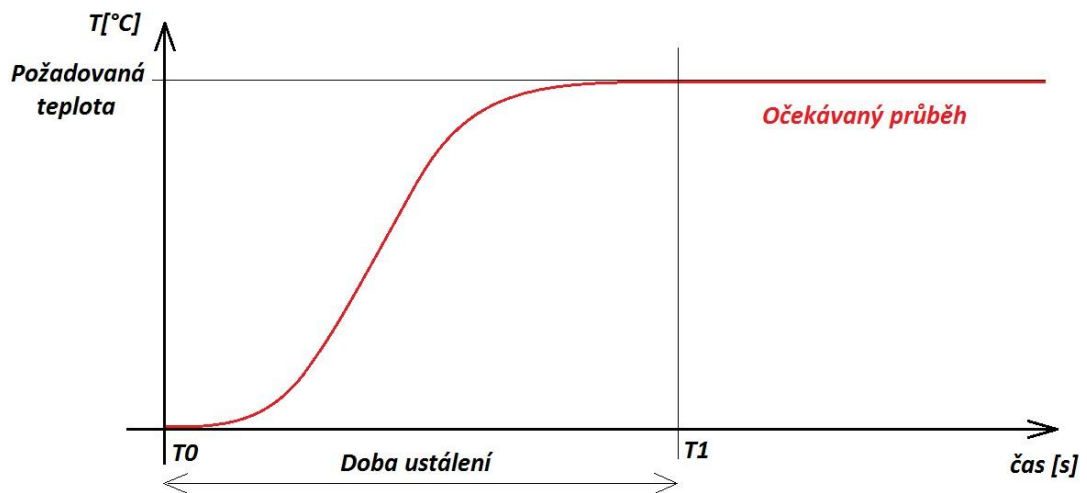
Prvním krokem při návrhu regulačního systému je intuitivní rozvaha řešení problému. Na základě nastudovaných informací o problematice regulace teploty, způsobech ohřevu a rozboru použité pece, je možné získat představu o způsobu řešení problému. Mezi nejdůležitější předpoklady lze zařadit návrh struktury regulační soustavy a očekávaný průběh teploty.

Při návrhu struktury regulační soustavy byla použita zpětnovazební struktura, jejíž hlavní částí je Controller. Ten na základě požadované hodnoty a zpětnovazební hodnoty ovládá topná tělesa. Tato tělesa jsou zahřívána průchodem elektrického proudu a ohřívají vnitřní prostor pece. Controller získává informaci o změně teploty díky měření pomocí termočláňkového teploměru, jehož hodnota teploty je zpětnovazebně zavedena do controlleru. Rozdílem požadované teploty a zpětnovazební teploty získává informaci o následném regulačním zásahu. Tato struktura je zobrazena na obrázku 3.2.



Obr 3.2 Představa o struktuře

Při vytváření představy o očekávaném průběhu teploty v elektrické peci a tím i předpokladu přenosové funkce, bylo nutné zvážit hodně parametrů. Mezi hlavní parametry patřil přenos a šíření tepla, účinnost topných těles, předpokládaná tepelná kapacita pece a její setrvačnost. Předpokládaný průběh teploty je zobrazen ve grafu 3.1. Doba ustálení teploty na dané hodnotě bude přibližně 3600 s, takže nemůžeme předpokládat vysokou dynamiku systému. Z tvaru průběhu lze předpokládat, že přechodová charakteristika bude pravděpodobně aperiodická druhého a vyššího řádu.

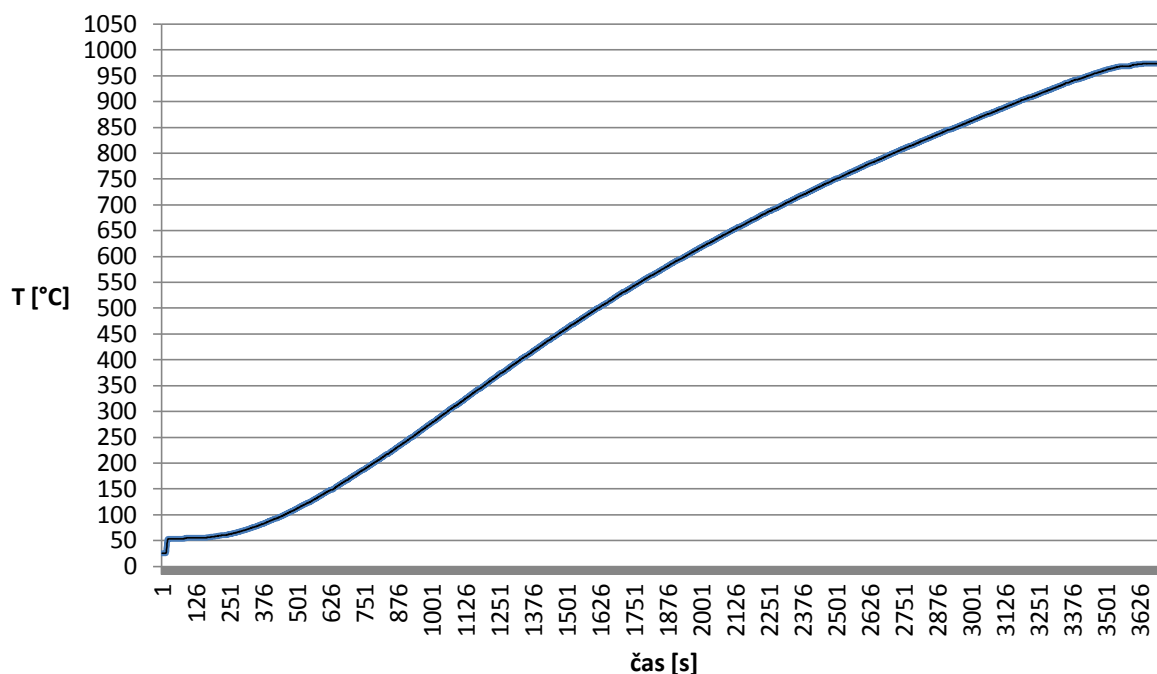


Graf 3.1 Představa o průběhu

3.2.2 Upřesnění intuitivních představ

Dalším krokem návrhu regulačního systému je praktické změření parametrů přechodové charakteristiky a následný matematický odhad přechodové funkce řízeného systému.

Přechodová charakteristika je grafické znázornění odezvy systému na jednotkový Heavisideův skok na vstupu systému. Změřená charakteristika regulované pece je zobrazena na grafu 3.2 a potvrzuje předem stanovené předpoklady, které byly stanoveny v kapitole Intuitivní představa o problému.

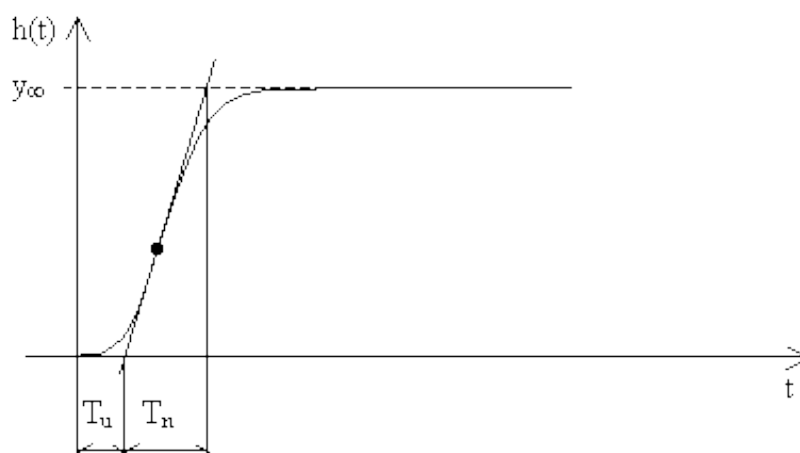


Graf 3.2 Změřená přechodová charakteristika

Naměřená přechodová charakteristika je aperiodická a pro získání přechodové funkce ji lze aproximovat pomocí proporcionální soustavy druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami nebo proporcionální soustavou n-tého řádu se stejnými časovými konstantami. Volba soustavy záleží na hodnotě parametru τ , který lze vypočítat ze vztahu 3.1, kde T_U je doba průtahu a T_N je doba náběhu.

$$\tau = \frac{T_U}{T_N} \quad (3.1)$$

Tyto parametry lze získat u naměřené přechodové charakteristiky podobně, jako je to zobrazeno ve grafu 3.3.

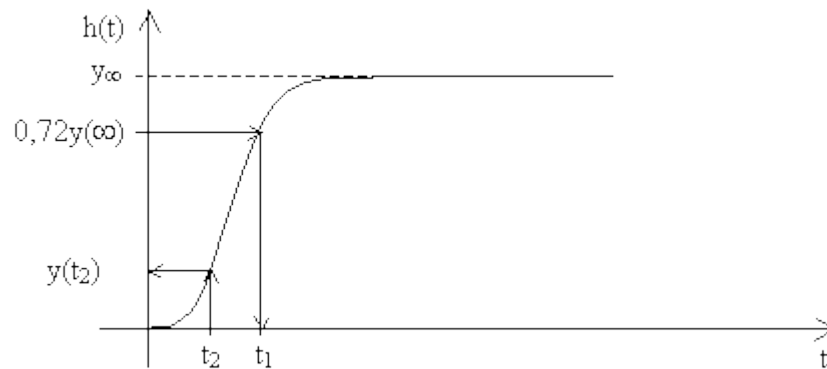


Graf 3.3 Přechodová charakteristika s vyznačenou dobou náběhu a průtahu (převzato z[8])

Na základě provedeného měření a výpočtu bylo stanoveno, že změřenou přenosovou charakteristiku lze aproximovat pomocí proporcionální soustavy druhého řádu s rozdílnými časovými konstantami. Tato soustava je vyjádřena vztahem 3.2.

$$G(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{k}{as^2+bs+1} \quad (3.2)$$

Hodnoty přenosu byly určeny následujícím způsobem:



Graf 3.4 Přechodová charakteristika – získání hodnot pro výpočty (převzato z[8])

1. Pro hodnotu $0,72y$ byl odečten z přechodové charakteristiky časový okamžik t_1 a vypočten součet časových konstant T_1 a T_2 podle vztahu:

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} \quad (3.3)$$

2. Dále byl vypočten časový okamžik t_2 podle vzorce:

$$t_2 = 0,3574 * (T_1 + T_2) \quad (3.4)$$

3. Z grafu přechodové charakteristiky byla odečtena hodnota $y(t_2)$.
4. Podle tabulky 3.1 jsem určil poměr časových konstant τ_2 , kde:

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} \quad (3.5)$$

$y(t_2)$	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16
τ_2	0,000	0,043	0,084	0,128	0,183	0,264	0,403	1,000

Tab 3.2 Tabulka poměrů časových konstant (převzato z [8])

5. Ze známého součtu a poměru časových konstant vypočteme T_1 a T_2

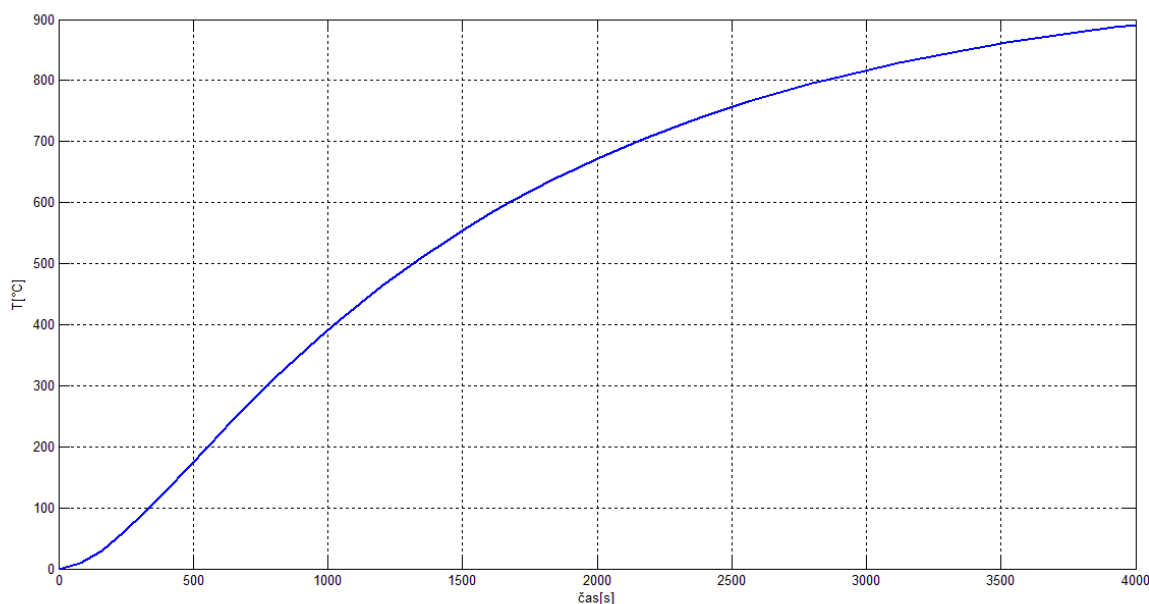
Tyto konstanty byly určeny jako: $T_1 = 212$

$$T_2 = 1500$$

Přenosová funkce soustavy byla stanovena jako:

$$G(s) = \frac{k}{(T_1s+1)(T_2s+1)} = \frac{k}{as^2+bs+1} = \frac{1}{318000s^2+1712bs+1} \quad (3.6)$$

Po provedeném výpočtu byla provedena simulace vypočtené přenosové funkce, která je zobrazena na grafu 3.5. Vypočtená přechodová charakteristika je téměř identická s přechodovou charakteristikou změřeného systému. Pro simulace byl použit program Matlab Simulink. Pro výpočty byla použita literatura [8].



Graf 3.5 Simulace vypočtené přechodové funkce

3.2.3 Výběr metody regulace

Následujícím krokem při návrhu regulačního systému je určit strukturu a druh regulace. Při návrhu můžeme vybírat z několika možností, jako jsou reléový regulátor, PID regulátor, stavový regulátor, Fuzzy regulátor, složitější typy regulátorů a kombinace jednotlivých typů. Každý ze zmíněných typů regulátorů má své klady i zápory závislé na regulovaném systému.

Reléový regulátor je vhodný pro regulace systémů, u kterých nevyžadujeme velmi vysokou přesnost regulované veličiny. Vyznačuje se jednoduchým konstrukčním řešením a je často používán pro jednoduché regulační systémy s dvoustavovým výstupem regulátoru ve smyslu zapnuto/vypnuto.

PID regulátor je vhodný pro regulace systémů, u kterých vyžadujeme vyšší přesnost regulace, než tomu bylo u reléového regulátoru. Nevýhodou tohoto regulátoru je, že dokáže uregulovat systém nejvýše druhého řádu. Tento řád je pro většinu standardních regulovaných

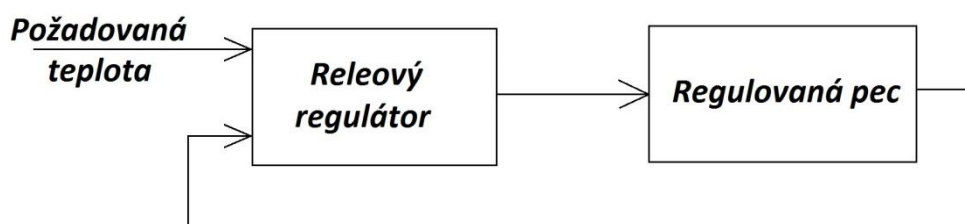
systémů dostačující. Ale systémy s vyšším dopravním zpožděním, vyšší setrvačností a dlouhou dobou ustálení mohou vykazovat charakter vyššího řádu než je dva. Oba dva zmíněné systémy nevyžadují žádné konstrukční zvláštnosti a z tohoto důvodu jsou často používanými v praktické realizaci regulátorů.

Dalším zmíněným regulačním systémem je **Stavová regulace**, jejíž výhodou je možnost uregulování systému i vyššího řádu než je řád dva. Vyžaduje však pro svou činnost znalost všech stavových proměnných a vyznačuje se složitějším konstrukčním návrhem. V případě regulace elektrické pece, by bylo nutné snímat teplotu z několika teploměrů.

Po zvážení informací o jednotlivých systémech řízení a konstrukčním uspořádání pece bylo rozhodnuto, že nejvhodnější způsob regulace bude kombinace jednotlivých typů. A to reléová regulace a PID - reléová regulace. Navrženy budou oba typy regulátorů a nakonec zváženo, který typ je pro tuto aplikaci lepší. Konečný navrhovaný systém bude tedy duální a uživatel si bude moci vybrat, jaký typ regulátoru chce použít.

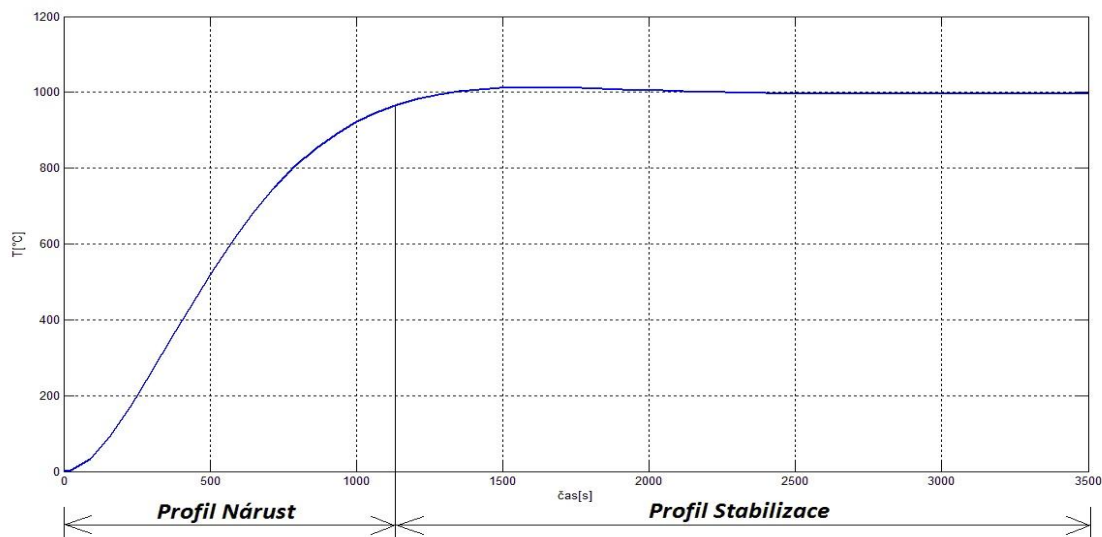
3.2.4 Reléová regulace

Jako první způsob regulace teploty pece byl zvolen reléový regulátor z důvodu jednoduchosti a konstrukčnímu řešení pece. Strukturální schéma je zobrazeno na obrázku č. 3.3.



Obr 3.3 Strukturální schéma reléového regulátoru

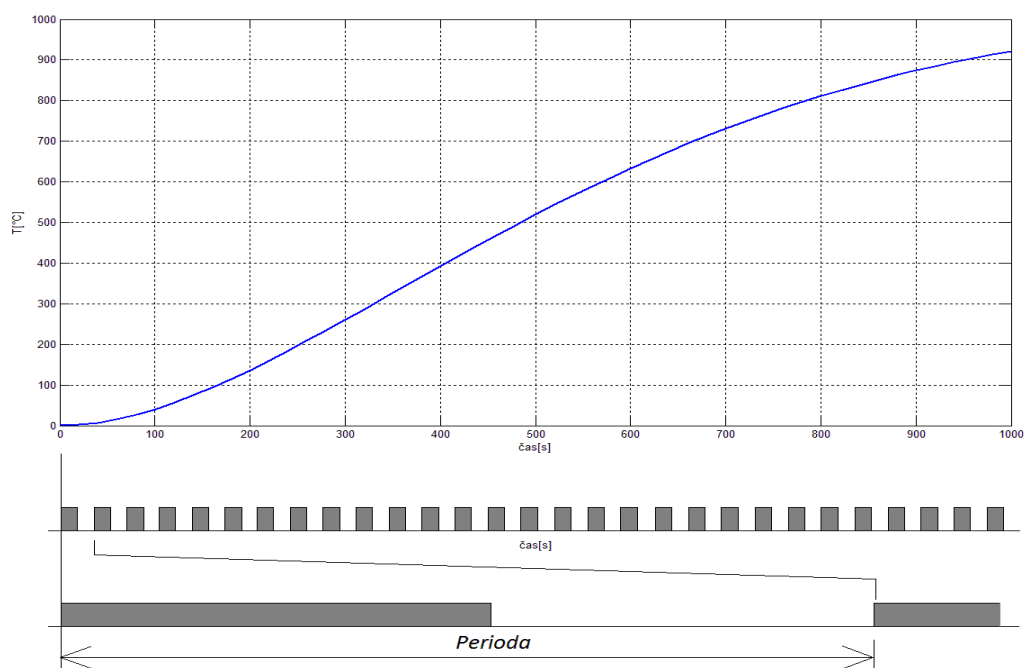
Jedním z požadavků na možnosti ovládní bylo, aby uživatel mohl nastavovat různé hodnoty nárůstu teploty a následně po dosažení požadované teploty byla provedena stabilizace dle nastaveného teplotního profilu. Z tohoto důvodu byl nárůst a stabilizace teploty rozdělen do dvou profilů zobrazených ve grafu č. 3.6. Výkon topných článků je regulován změnou střídavé spínání, která byla odvozena z naměřených hodnot. Z nichž byly stanoveny parametry pro optimální nastavení teplotního nárůstu a teplotní stabilizace. Nastavení těchto profilů je vysvětleno v podkapitolách *Profil nárůst teploty* a *Profil stabilizace teploty*.



Graf 3.6 Rozdělení funkcí regulátoru

Profil nárůst teploty

Jak bylo napsáno výše, výkon topných článků je regulován změnou střídavého napětí. Velikost střídavého napětí byla odvozena z naměřených hodnot a perioda byla stanovena na hodnotu 44 s. Pro představu byl přiložen obrázek č. 3.4, na kterém je zobrazen nárůst teploty z počátečního stavu do stavu požadovaného. Maximální nárůst teploty byl stanoven na hodnotu 16 °C/min z důvodu linearizace teplotního nárůstu, více o linearizaci teplotního nárůstu je napsáno v kapitole *Programové řešení práce*. Po provedení přepočtu hodnot linearizace je možné spínat topná tělesa stejnou střídou po celou dobu trvání nárůstu teploty až do požadované hodnoty.



Obr 3.4 Průběh spínání topných článků

Profil stabilizace teploty

Pracuje na podobném principu jako profil nárůst teploty. Rozdílem je, že po dobu stabilizace se mění střída spínání a tím se nastavuje požadovaný výkon topných článků. Perioda spínání byla stanovena na hodnotu 5 s. Pokaždé po uplynutí periody dojde k propočtu a nastavení nové střídy spínání.

Ve snaze zabránit velkému překmitu teploty nad požadovanou, bylo stanoveno teplotní okno pod hladinou požadované teploty a následně bylo rozděleno na procenta. Dle procentuální hodnoty je nastavena doba sepnutí topných článků. Tímto způsobem je získáno sta stavů pro nastavení střídy. Doba se stavem sepnuto se může tedy pohybovat v rozmezí 0 – 5 s, a doba se stavem vypnuto se dopočte odečtením periody mínus doby sepnutí. Při překročení požadované teploty je nastavena doba sepnuto na 0 s a doba vypnuto na 5 s. Následkem vlastní setrvačnosti pece klesne teplota na požadovanou hodnotu, kde následně regulátor svými zásahy doregulovává teplotu na požadovanou hodnotu. Tímto způsobem je možné rychle a efektivně doregulovat teplotu na požadovanou hodnotu. Další informace o použité reléové regulaci jsou uvedeny v kapitole *Programové řešení práce*.

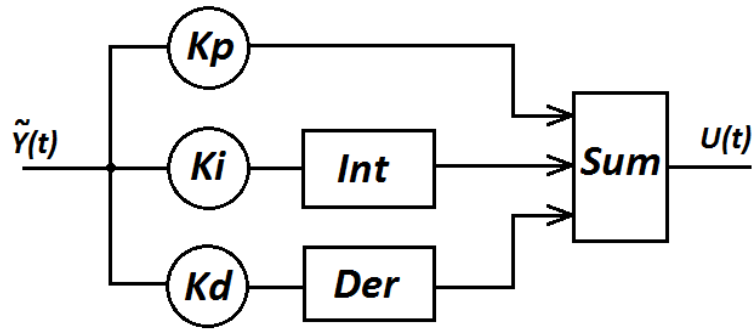
3.2.5 PID – reléová regulace

Jako druhý způsob regulace teploty, byl zvolen PID regulátor, který byl implementován do již fungujícího Reléového regulátoru, za účelem zlepšení vlastností regulace. Na obrázku č. 3.5 je zobrazeno strukturální schéma PID – reléového regulátoru.



Obr 3.5 Strukturální schéma PID – reléového regulátoru

Vstupem PID regulátoru je rozdíl hodnot požadované a aktuálně měřené teploty. Tato rozdílová hodnota je dále zpracována vnitřní strukturou PID regulátoru, která je zobrazena na obrázku č. 3.6. Na obrázku si můžeme všimnout tří paralelních větví a to Proporcionální, Integrační a Derivační a jejich konstant K_p , K_i a K_d . Výstupy paralelních větví jsou zavedeny do sumátoru a výstupem PID regulátoru je optimální regulační zásah.



Obr 3.6 Vnitřní struktura PID regulátoru

Z důvodu konstrukčního řešení regulované pece byl dále použit blok nazvaný reléový výstup, který zpracovává výstup PID regulátoru a přetváří ho na stavovou reprezentaci s pevnou délkou periody a proměnnou délkou střídy. Tato proměnná délka střídy pracuje na stejném principu jako reléová regulace popsaná výše. Další informace o použité PID – reléové regulaci jsou uvedeny v kapitole *Programové řešení práce*.

Výhodou přidání bloku PID regulátoru bylo získávání informace o stavu, který ještě nenastal, ale brzy nastane. Díky této informaci jsme schopni provést regulační zásah dříve, což u systému s velkou setrvačností jako je elektrická pec může urychlit a zpřesnit regulaci bez velkých překmitů či podkmitů.

Výpočet parametrů PID regulátoru

Jak bylo zjištěno výpočty a simulacemi je přenosová funkce řízené soustavy ve tvaru:

$$F_S(p) = \frac{k}{(T_1s+1)*(T_2s+1)} = \frac{k}{as^2+bs+1} \quad (3.7)$$

Přenos PID regulátoru je uvažován ve tvaru:

$$F_R(p) = k_p + \frac{k_I}{p} + k_D p \quad (3.8)$$

Přenos systému po uzavření zpětné vazby je tedy uvažován ve tvaru:

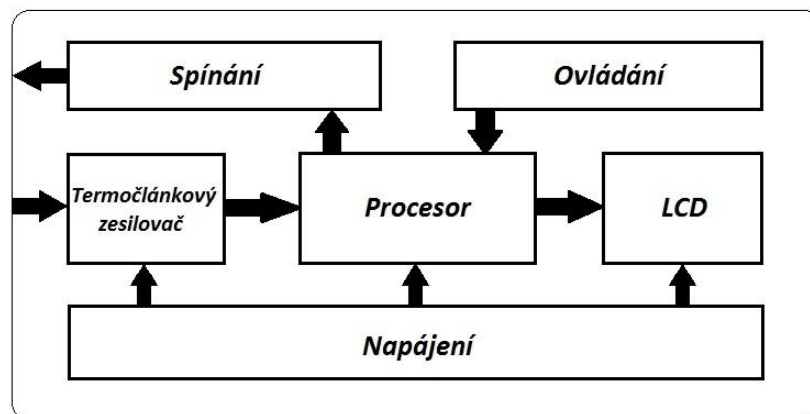
$$F(p) = \frac{F_R(p)*F_S(p)}{1 + F_R(p)*F_S(p)} = \frac{(k_p + \frac{k_I}{p} + k_D p) \frac{k}{as^2+bs+1}}{1 + (k_p + \frac{k_I}{p} + k_D p) \frac{k}{as^2+bs+1}} \quad (3.9)$$

Z tvaru přenosové funkce uzavřeného systému lze určit charakteristický polynom. Z charakteristického polynomu je možné vypočítat konstanty PID regulátoru: k_p , k_I a k_D . Tyto konstanty byly vypočítány několika metodami a následně otestovány simulacemi v programu Matlab Simulink. Následně bylo pomocí simulací a zkoušek hledáno optimální nastavení konstant PID regulátoru.

3.3 Použité komponenty

Hlavním konstrukčním prvkem regulačního zařízení je mikroprocesor STM32F407vgt6. Tento procesor řídí veškerou činnost zařízení, jako je snímání teploty uvnitř řízené pece, nastavování a automatický průběh teplotních profilů, spínání topných těles, uživatelské prostředí a bezpečnostní ochrany. Popis jednotlivých prvků je uveden v podkapitolách.

Na obrázku č. 3.7 je uvedeno blokové uspořádání regulačního zařízení. Z regulované pece vstupuje do zařízení analogová hodnota napětí termočláňkového teploměru. Tato hodnota je zesílena v termočláňkovém zesilovači a zpracována mikroprocesorem. Mikroprocesor poté dle nastavených teplotních profilů přes uživatelské prostředí reguluje rychlost spínání elektrických topných těles. Uživatelské prostředí je tvořeno LCD displejem, tlačítkovým ovladačem a signalizačním panelem.



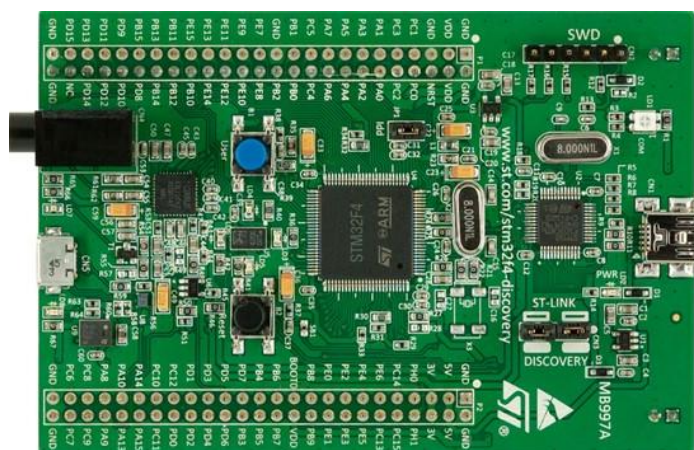
Obr 3.7 Blokové schéma navrhovaného systému

3.3.1 Mikroprocesor STM32F4

Hlavními požadavky kladených na zařízení jsou jednoduché a intuitivní ovládání uživatelského prostředí bez složitého nastavování. Z důvodu, aby se zařízením mohla pracovat i neškolená osoba. Dále pak možnost nastavení různých teplotních profilů pro vytápění elektrické pece. A nakonec následná regulace teploty dle předem nastavených teplotních profilů.

Z uvedených požadavků plynou nároky na mikroprocesor, jako je dostatečně velká programová paměť Flash, vysoká rychlost, analogově/digitální převodník a dostatek čítačů/časovačů. Výběr mikroprocesoru ovlivnily tedy výkonové požadavky a také další, jako jsou dostatečné množství vstupně/výstupních portů, konstrukční provedení atd. Dále byl výběr omezen na mikroprocesory architektury ARM, z důvodu vlastního zájmu a mnohem vyššího výkonu než nabízení běžné 8-bitové a 16-bitové RISC procesory.

Na základě výše uvedených specifikací jsem vybral mikroprocesor STM32F407VTG6 od firmy STMicroelectronics. Jedním z důvodů výběru kromě dostatečného výkonu byla dostupnost vývojové desky STM32F407 Discovery Kit, na které byl postaven návrh systému. Dále pak vývojové prostředí pro programování a dobrá podpora firmy STMicroelectronics v podobě ukázkových příkladů a dobře zpracované dokumentace. Na obrázku č. 3.8 je zobrazen vývojový modul STM32F407 Discovery.

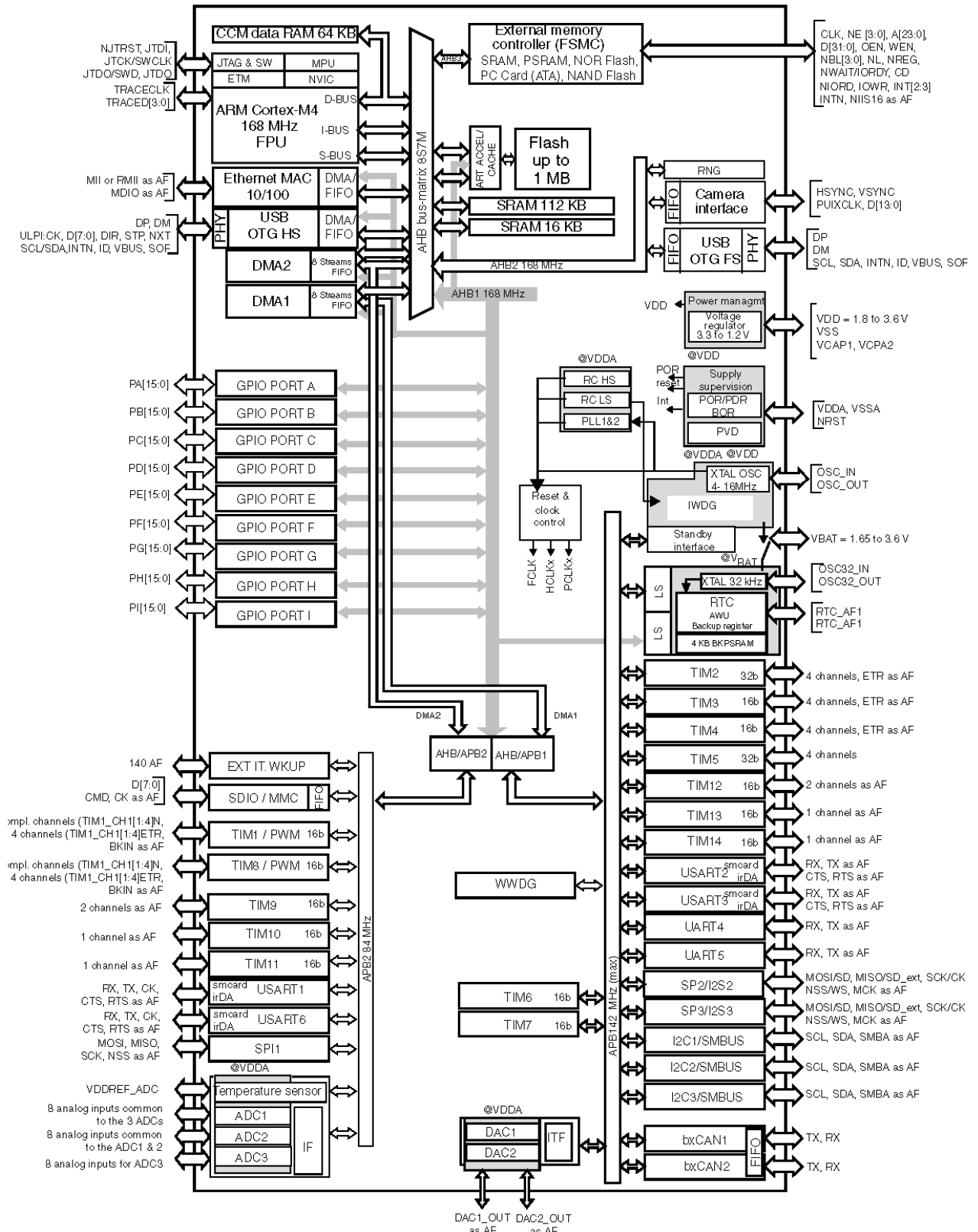


Obr 3.8 Vývojový modul STM32F407 Discovery (převzato z [10])

Parametry mikropočítače ARM32F407VGT6:

- *Jádro ARM 32-bit Cortex™ - M4*
- *Pracovní frekvence až 168 MHz*
- *Pouzdro LQFP100*
- *Napájecí napětí 1,8 – 3,6 V*
- *Paměti*
 - *1Mbyte Flash paměti programu*
 - *192Kbyte SRAM*
- *Nízká spotřeba*
 - *Režimy spánku, stop a pohotovostní*
 - *Bateriové napájení pro RTC, zálohovací registry*
- *Převodníky*
 - *3x12-bit A/D převodník*
 - *2x12-bit D/A převodník*
- *čítače a časovače*
 - *12x 16-bit časovač s frekvencí až 168MHz*
 - *2x 32-bit časovač s frekvencí až 168MHz*
- *Komunikační rozhraní*
 - *3 x I2C rozhraní*
 - *2 x I2S*
 - *4 x USART*
 - *2 x UART*
 - *3 x SPI*
 - *2 x CAN rozhraní (2.0B)*
 - *SDIO rozhraní*

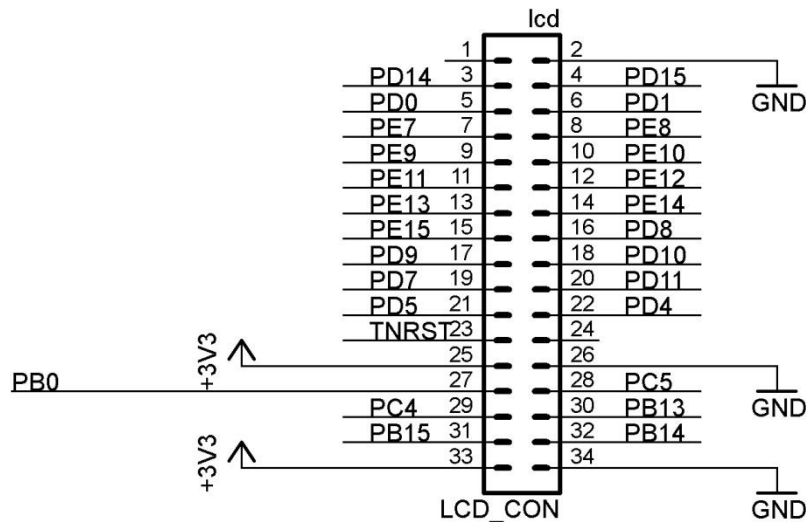
- Ethernet MAC 10/100
- 2 x USB OTG
- Režimy ladění
 - SWD
 - JTAG



Obr. 3.9 Blokové schéma mikroprocesoru STM32F407 (převzato z [11])

3.3.2 LCD - 3.2“ TFT Display Module HY32C

Pro komunikaci s uživatelem byl použit 3,2 palcový TFT barevný LCD modul. LCD displej je vybaven řadičem HY32C a je možné ho připojit pomocí 40 pinového rozhraní k mikroprocesoru. Jedná se o často používaný displej na vývojových deskách od STMicroelectronics. Na obrázku č. 3.10 je zobrazeno připojení na piny procesoru STM32F407.

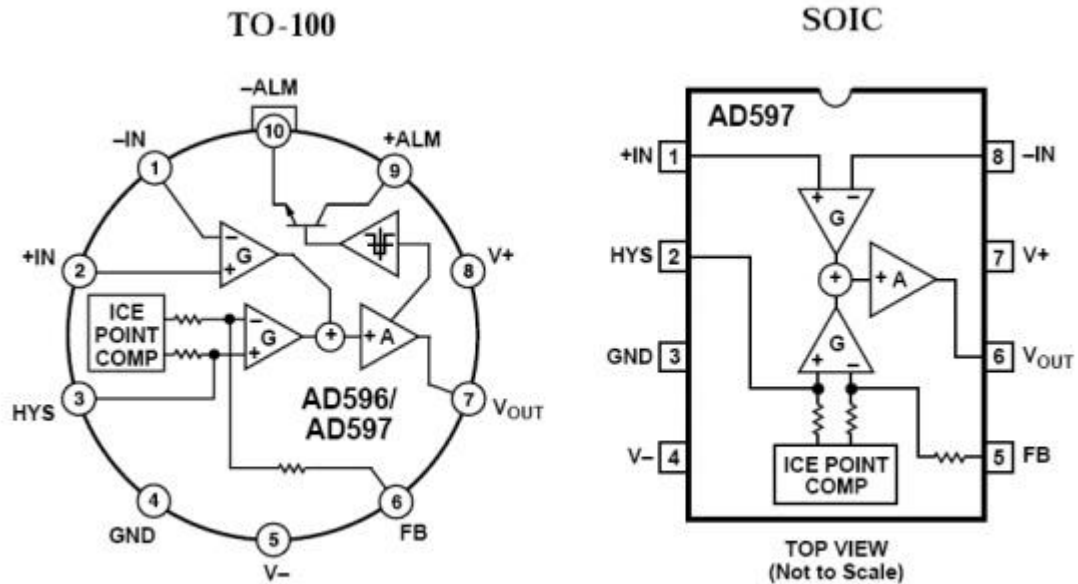


Obr 3.10 Připojení LCD displeje

3.3.3 Zesilovač termoelektrického napětí AD597

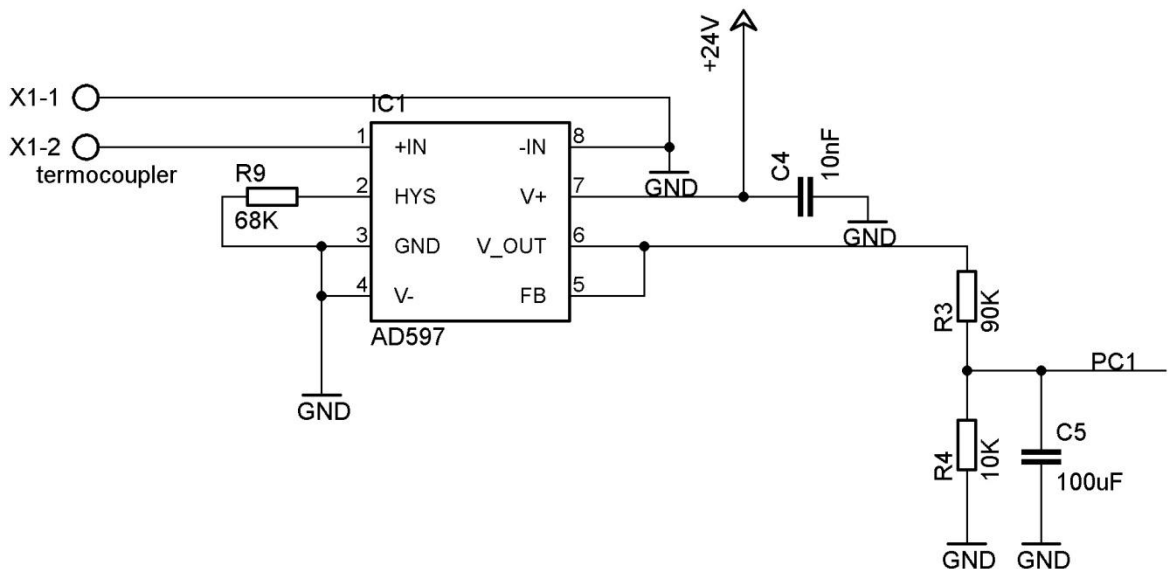
Pro snímání teploty uvnitř pece byl použit termočlánekový teploměr typu K, který je uložen v ochranném keramickém pouzdře a vyveden v zadní stěně pece. Jelikož výstupní napětí termočlánu se pohybuje řádově v jednotkách až desítkách milivoltů je nutné před zpracováním signálu mikroprocesorem tento signál zesílit a kompenzovat vliv studeného konce. K tomuto účelu byl použit obvod AD597.

Jedná se o integrovaný obvod od firmy Analog Devices speciálně určený pro K - termočlánu. Je vybaven zesilovačem termoelektrického napětí a kompenzací studeného konce termočlánu. Výstupní napětí je zesíleno z jednotek milivoltů na jednotky voltů s krokem výstupního napětí 10 mV/°C. Teplotní rozsah je dán vlastnostmi termočlánu typu K a napájecím napětím obvodu. Teplotní rozsah K termočlánu je -200 °C až 1250 °C. Pokud chceme měřit záporné teploty, musíme obvod napájet i záporným napětím. Pokud tuto funkci nevyžadujeme, vystačíme s napájecím napětím v rozsahu 5 V až 30 V. Velikost napájecího napětí je závislá na velikosti měřené teploty. Na obrázku č. 3.11 je ukázána vnitřní struktura obvodu AD597 a používané typy pouzder.



Obr 3.11 Obvod AD597 – vnitřní struktura (převzato z [12])

Při návrhu bylo nahlédnuto k doporučeným radám v datovém listu obvodu AD597. Jelikož potřebuji měřit pouze kladné hodnoty, bylo zvoleno napájecí napětí 24 V pro kladnou napájecí svorku V+ a záporná napájecí svorka V- byla uzemněna. Vzhledem k měřenému rozsahu teplot 0 – 1250 °C se výstupní napětí pohybuje v rozsahu 0 až 12500 mV. Toto napětí bylo sníženo pomocí děliče na hodnotu vhodnou pro A/D převodník mikroprocesoru.

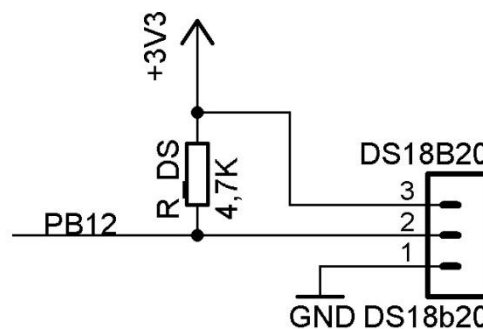


Obr 3.12 Obvod AD597 – zapojení

3.3.4 Teplotní senzor Ds18b20

Jedná se o teplotní senzor vyvinutý společností Dallas Semiconductor. Byl navržen jako jednoúčelový obvod komunikující s mikroprocesorem po jednovodičové sběrnici. Díky této sběrnici je možné připojit za sebe několik senzorů a komunikací Master-Slave vyčítat hodnoty teplot z jednotlivých senzorů. Teplotní rozsah tohoto senzoru je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tohoto důvodu se používají pouze jako orientační teploměry. Každý ze senzorů má své vlastní 64bitové volací číslo a vlastní ROM paměť. Díky tomuto 64bitovému číslu je zabezpečeno, aby na sběrnici komunikoval vždy jen jeden senzor. Velkou výhodou tohoto senzoru je, že nevyžaduje žádné další externí komponenty.

Tento senzor byl v regulačním zařízení použit pro měření teploty poblíž elektroniky. Je umístěn přímo na tištěném spoji mezi ostatními součástkami. Slouží jako ochrana proti přehřátí systému a poškození součástek jako jsou elektrolytické kondenzátory a další. Jako reakce na zvýšenou teplotu je signalizace upozornění na displeji s momentální měřenou teplotou a zapnutí cirkulace vzduchu pomocí ventilátorů. V případě dalšího zvyšování teploty v místě senzoru je toto chování vyhodnoceno jako havarijní stav a zvolený program ohřevu se resetuje a vypne se spínání topných článků. Na obrázku 3.13 je znázorněno připojení senzoru s mikropočítači.



Obr 3.13 Připojení senzoru DS18B20

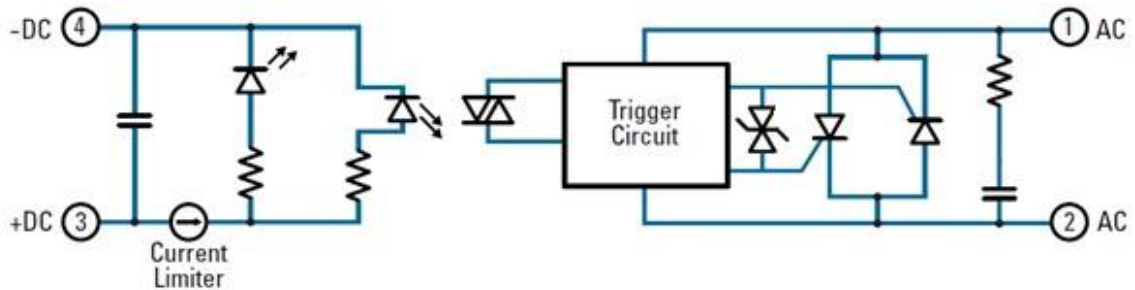
3.3.5 Spínání výkonové zátěže

Jedním z požadavků zadavatele práce bylo co nejvíce zachovat strukturu používané elektrické pece. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl zachovat použitá topná tělesa, která byla spínána impulsně ve velkých časových intervalech.

Navrhovaný systém využívá podobného reléového principu regulace teploty s rozdílem délky doby spínání. Tato doba byla zkrácena a výkon topných těles se reguluje změnou střídly doby zapnuto a vypnuto. Z tohoto důvodu není možné použití mechanického relé, kde by docházelo k rychlé degradaci kontaktů a stávalo by se zdrojem rušení a poruch. Dále s ohledem na navrhovaný regulační systém, který je tvořen mikroprocesorem, bylo pro

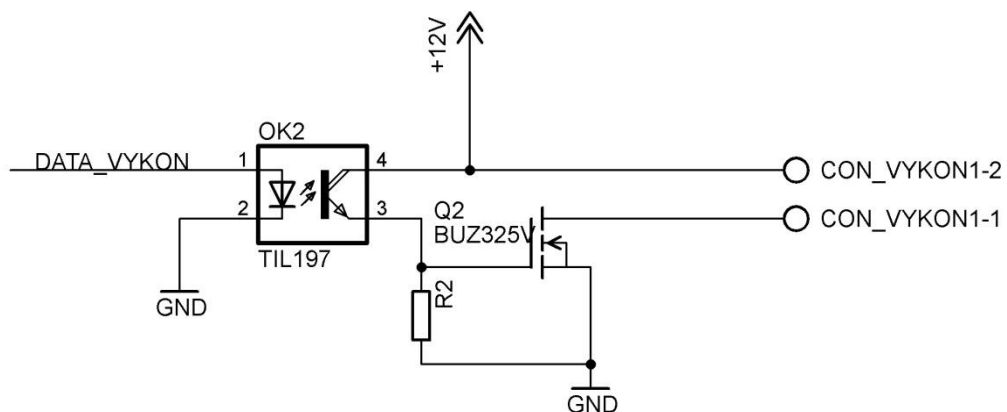
spínání topných těles vybráno polovodičového relé.

Jako vlastní spínací prvek bylo vybráno polovodičové relé od firmy Crydom pod označením D2425. Výhodou tohoto spínacího prvku je galvanické oddělení výkonové části od části spínací, vysoká frekvence spínání bez opalování kontaktů a bezhlučnost. Parametry použitého relé jsou závislé na velikosti spínaného výkonu a ovládacím napětím. Typ D2425 je ovládán napětím v rozsahu 3 – 32 V DC, výkonová část je navržena pro zatížení 230 V a 25 A AC. Na obrázku 3.14 je znázorněna vnitřní struktura polovodičového relé Crydom D2425.



Obr 3.14 Vnitřní struktura relé (převzato z [13])

Pro spínání polovodičového relé bylo použito napětí 12 V, které bylo spínáno mikroprocesorem přes optočlen pomocí unipolárního tranzistoru. Na obrázku č. 3.15 je znázorněno schéma spínání polovodičového relé. Stejného zapojení bylo použito pro spínání ventilátorů.



Obr 3.15 Spínání polovodičového relé

3.4 Návrh DPS

Pro návrh desek plošných spojů byl použit editor plošných spojů Eagle Light 6.2.0. Jedná se o volně šiřitelnou verzi tohoto programu pro návrh desek plošných spojů. Při návrhu v editoru schémat bylo dbáno na doporučená zapojení podle dokumentace použitých součástek. Dále byly doplněny prvky pro ochranu zařízení proti rušení a krátkodobým výpadkům napájení. Z důvodu miniaturizace a použití obvodů, které se vyrábějí pouze

v SMD provedení, byla použita převážná většina součástek typu SMD. Klasické THT součástky byly použity pouze pro zdrojové, spínací a ovládací prvky. Hlavním důvodem jejich použití byl lepší odvod tepla ze zdrojových a spínacích prvků a také zde nebyla nutná minimalizace. Při úpravách v editoru schémat spojů bylo dbáno na dostatečnou šířku propojovacích cest a izolační vzdálenost. Velká pozornost byla dána na vhodné umístění stabilizačních kondenzátorů, dostatečnou šířku napájecí cesty a oddělení digitálního a analogového napájení. Dále byla snaha o umístění analogového vedení v dostatečné vzdálenosti od často se měnících signálů. Posledním krokem bylo rozlití země na desce plošného spoje z důvodu eliminace působení vnějších rušivých signálů.

Při návrhu konstrukce byla použita modulární struktura. Regulační zařízení je rozděleno na 3 hlavní desky (displej, hlavní deska a zdrojová deska) a 2 ovládací desky (tlačítkový modul a signalizační modul). Tato konstrukce byla zvolena z důvodu kompaktnosti a minimalizace zařízení. Obvodová zapojení a návrhy desek plošných spojů s osazovacími plány jsou uvedeny v přílohách.

4 Programové řešení práce

Program určený pro řízení mikroprocesoru STM32f407 byl vytvořen ve vývojovém prostředí uVision 4 od společnosti Keil. Tento program byl vytvořen k vývoji, testování a ladění mikroprocesorů rodiny ARM s kompletní podporou pro Cortex-M, Cortex-R4, ARM7, ARM9. Vývojové prostředí uVision4 nabízí kromě editačního prostředí také možnost sdružovat soubory do projektů, rozsáhlou GUI knihovnu, kvalitní simulátor, debugger a mnoho dalších funkcí. Propojením jednotlivých programů byl vytvořen mocný nástroj pro programování mikroprocesorů ARM, využívaný i profesionálními programátory velkých společností.

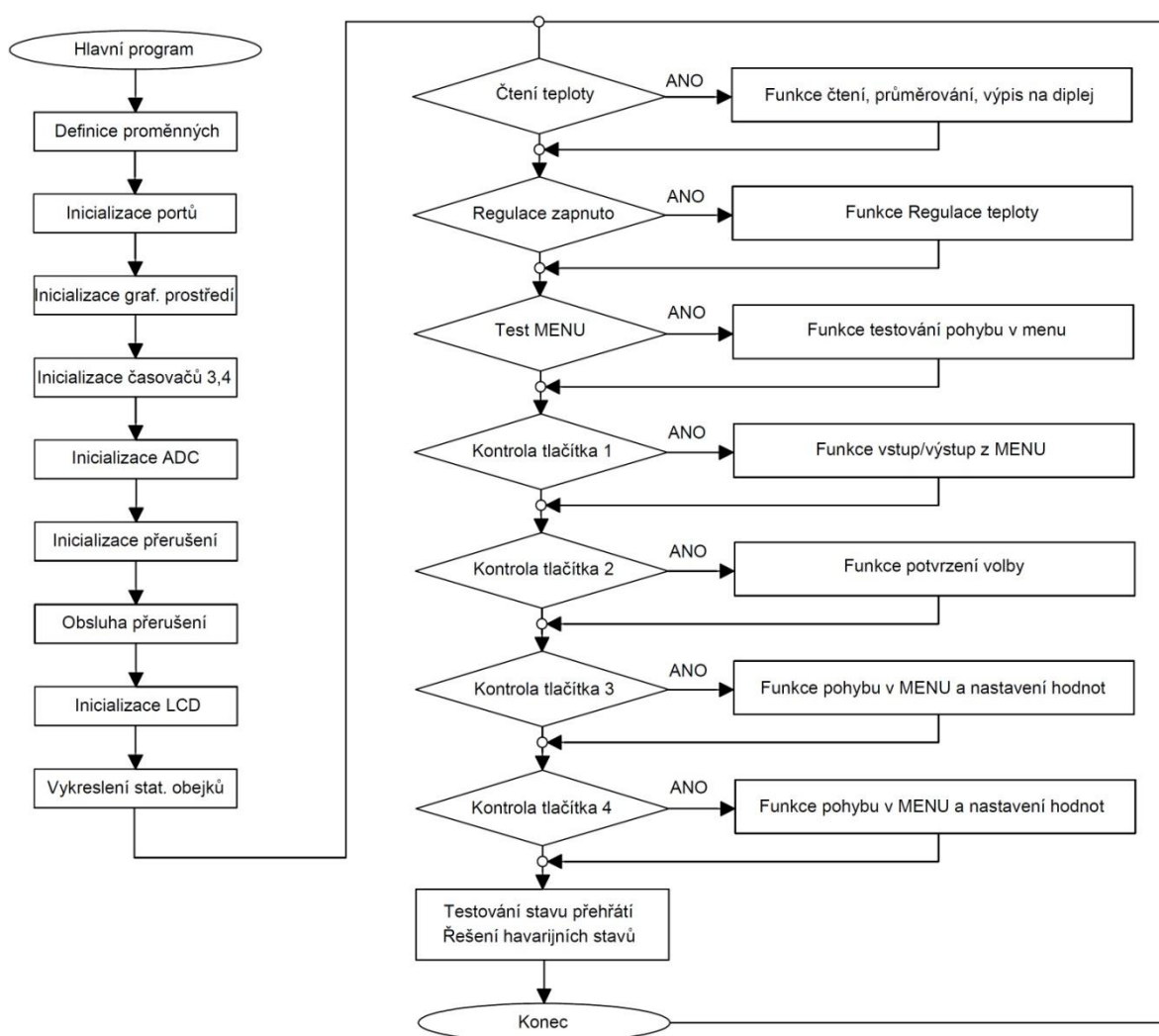
Programování a ladění mikroprocesoru STM32f407 proběhlo pomocí programátoru ST-link, který je implementován v Discovery kitu od společnosti STM. Pro správnou činnost tohoto programátoru, musíme k programu Keil uVision 4 nainstalovat program ST-Link Utility. Pro následnou komunikaci s procesorem bylo použito SWD rozhraní.

Před samotným vytvořením konečného programu, bylo nutné se nejprve seznámit s vývojovým prostředím Keil uVision4 a samotným mikroprocesorem. První testování mikroprocesoru a základních funkcí proběhlo na vývojovém modulu od společnosti STM nazvaném Discovery kit. Otestovány byly hlavně funkce, se kterými měl mikroprocesor pracovat ve finální podobě programu. Mezi tyto funkce patřilo ovládání portů mikroprocesoru, tlačítek, časovačů/čítačů, přerušení, analogově-digitálního převodníku a základní programy s těmito funkcemi. Pro nastavení a inicializaci funkcí mikroprocesoru byly použity jak přímé hardwarové příkazy, tak knihovní funkce od společnosti STM nalezené na jejich internetových stránkách. Následně byly vytvořeny testovací hardwarové moduly, na kterých byly tyto programy odzkoušeny. Nakonec byl vytvořen prvotní vývojový diagram finálního programu, který blokově popisuje základní kostru programu.

Hlavní částí navrhovaného programu je, regulátor teploty pracující s reléovým výstupem. Ze zpracovaných teoretických předpokladů uvedených výše v textu, plynou funkce potřebné k realizaci regulátoru. Mezi hlavní funkce patří analogově-digitální převodník, časovač a přerušení. Způsob nastavení některých funkcí je rozepsán více v následujících podkapitolách.

Kromě požadavků kladených na regulaci teploty zprostředkované navrhnutým regulátorem, byly kladeny požadavky na snadné a intuitivní ovládání regulátoru a ochranu systému v případě nepředvídatelné chyby. Ovládání regulačního zařízení je zprostředkováno pomocí tlačítek, velkého barevného LCD displeje a signalizačního panelu zobrazující aktuální teplotní profil. Uživatelské prostředí regulačního systému bylo navrženo tak, aby bylo pro

uživatele intuitivně ovladatelné, snadno nastavitelné a nedovolovalo uživateli nastavení, které by vedlo k závažné chybě. Ochrana zařízení byla provedena pomocí přídavného teplotního senzoru DS18B20 umístěného na základní desce. Hodnota teploty z tohoto senzoru je snímána a vyhodnocována její velikost. Pokud teplota na základní desce stoupne nad určitou mez, sepnou se ventilátory a na displeji je signalizován tento stav. Jestliže teplota stále stoupá a přesáhne havarijní mez, vytápění pece je okamžitě vypnuto, nastavení teplotních profilů je vymazáno a na displeji je signalizován havarijní stav. Ukázka signalizace a popis pohybu v menu je uveden v kapitole nazvané *Ovládání regulátoru*.



Obr. 4.1 Vývojový diagram programu

4.1 Nastavení MCU

4.1.1 Inicializace

Pro nastavení funkcí a periférii bylo využito hardwarových příkazů a knihovnických funkcí, které jsou součástí programu Keil uVision4. Procesory typu STM32f4xx jsou často používány pro zařízení s nízkou spotřebou, z tohoto důvodu jsou v základním nastavení veškeré periférie odpojeny od zdroje hodinového signálu a tím jsou vyřazeny z provozu. Aktivace periferního rozhraní, jako jsou porty, analogově/digitální převodník a další, je zprostředkována programovou aktivací hodinového signálu konkrétní periférie. Následně pro inicializaci požadované periférie je nutné její nastavení. Pro představu byla uvedena ukázka nastavení portů.

Inicializace portu výkonového spínání

```
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOC, ENABLE); // Povolit periferní hodiny GPIOC
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
GPIO_DeInit(GPIOC); // Reset brány GPIOC

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_8; // Nastavení pinu 8
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_OUT; // Nastavení jako výstupní pin
GPIO_InitStructure.GPIO_OType = GPIO_OType_PP; // Nastavení Push - Pull mode
GPIO_InitStructure.GPIO_Speed = GPIO_Speed_50MHz;
GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure); // Inicializace output GPIOA pin 3
```

Inicializace portu tlačítka

```
RCC_AHB1PeriphClockCmd(RCC_AHB1Periph_GPIOA, ENABLE); // Povolit periferní hodiny GPIOA
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;
GPIO_DeInit(GPIOA); // Reset brány GPIOA

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_3; // Nastavení pinu 3
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IN; // Nastavení jako Vstupní pin
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_UP; // Nastavení Pullup rezistoru na pinu
GPIO_Init(GPIOA, &GPIO_InitStructure); // Inicializace input GPIOA pin 3
```

Inicializace portu ADC1

```
RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_ADC1, ENABLE);
GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStructure;

GPIO_InitStructure.GPIO_Pin = GPIO_Pin_1;
GPIO_InitStructure.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AN;
GPIO_InitStructure.GPIO_PuPd = GPIO_PuPd_NOPULL ;
GPIO_Init(GPIOC, &GPIO_InitStructure);
```

4.1.2 Čítače/časovače

Při požadavku na pravidelné vykonávání nějaké události je nejjednodušším řešením využití časovače a jeho reakce na událost. Tuto událost lze využít jako podmínku pro vyvolání přerušení a kód, který budeme chtít pravidelně vykonávat, je umístěn v obsluze daného přerušení. Z tohoto důvodu je dále uvedeno nastavení čítače/časovače, přerušení a obsluhy přerušení.

Mikroprocesor disponuje celkem čtrnácti čítači/časovači, z nichž je dvanáct šestnácti bitových a dva třicetidva bitový. V navrhnutém programu byla použita dvojice šestnácti bitových čítačů/časovačů a to TIM3 a TIM4. První čítač/časovač byl použit z důvodu načítání hodnoty teploty z analogově/digitálního převodníku v určitých časových okamžicích a testování dlouhého stisku tlačítka pro zrychlené nastavování teploty. Tento čítač/časovač byl nastaven na hodnotu přetečení po každých 200 ms. Pro nastavení časové základny pro nastavování teplotních profilů, byl použit druhý zmíněný čítač/časovač. Tento druhý čítač/časovač byl nastaven na hodnotu přetečení po každé 1 s. Tyto čítače/časovače byly použity v režimu čítání nahoru a vyvolání události vlivem přetečení, bylo nastaveno podle vzorce č. 3.10 a vzorce č. 3.11. Kde hodnota *TimerClock* je hodnota maximální rychlosti hodin pro tento čítač, která je 84 KHz. *TIM_PSC* je registr pro nastavení hodnoty programovatelné předděličky, jejíž hodnota se pro šestnácti bitový čítač může pohybovat v rozmezí 1 až 65535. A *TIM_ARR* je registr pro nastavení hodnoty periody (auto reload).

$$UpdateEvent[Hz] = \frac{TimerClock}{(TIM_PSC+1)*(TIM_ARR+1)} = 5Hz \quad (3.10)$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5} = 0.2s = 200ms \quad (3.11)$$

Pro představu byla uvedena ukázka nastavení čítače/časovače 3, přerušení a obsluhy přerušení. Program v části obsluha přerušení, byl z důvodu zkrácení doby ve které program setrvává v přerušení, řešen formou příznakových proměnných. Reakce na tyto příznaky jsou řešeny v jednotlivých částech programu.

Nastavení časovače 3

```
void TIM3_Inicializace(void)
```

```
{
    TIM_TimeBaseInitTypeDef TIM_TimeBaseStructure;

    RCC_APB1PeriphClockCmd(RCC_APB1Periph_TIM3, ENABLE); //povolení hodin pro tim3
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_Period = 260;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_Prescaler = 65000;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_ClockDivision = 0x0;
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_CounterMode = TIM_CounterMode_Up; // Čítání nahoru
    TIM_TimeBaseStructure.TIM_RepetitionCounter = 0;

    TIM_TimeBaseInit( TIM3, &TIM_TimeBaseStructure ); // inicializace TIM3 podle předvolby
    TIM_Cmd( TIM3, ENABLE ); // Povolení časovače
    TIM_ClearFlag( TIM3, TIM_FLAG_Update ); // Smazat příznakový bit Tim3
    TIM_ITConfig( TIM3, TIM_IT_Update, ENABLE ); // Povolení TIM3 Update interrupt
}
```

Nastavení přerušení časovače 3

```
void NVIC_Configuration(void)
{
    NVIC_InitTypeDef NVIC_InitStructure;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannel = TIM3_IRQn;           //Reakce přerušení na TIM3
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelPreemptionPriority = 0; //nastavení priority
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelSubPriority = 0;
    NVIC_InitStructure.NVIC_IRQChannelCmd = ENABLE;
    NVIC_Init(&NVIC_InitStructure);
}
```

Obsluha přerušení časovače 3

```
void TIM3_IRQHandler(void)
{
    if (TIM_GetITStatus(TIM3, TIM_FLAG_Update) != RESET) // Kontrola přerušení
    {
        TIM_ClearITPendingBit(TIM3, TIM_FLAG_Update); // Smaže příznakový bit
        flag=1;
        flag_tlacitko1=1;
        flag_tlacitko2=1;
        flag_cas_200ms=1;
    }
}
```

4.2 Výpočet periody

Část programu nazvaná výpočet periody plní funkci linearizace teplotního nárůstu a vypočítává optimální poměr střídavy pro profil nárůst teploty. Tato funkce je volána vždy při načtení nové hodnoty teploty z teplotního senzoru uvnitř pece a dle velikosti teploty nastaví konstantu nárůstu. Tyto konstanty byly určeny z naměřených hodnot a následně dopočítány. Z těchto měření byly zhotoveny grafy a pro linearizaci co největší části křivky nárůstu byl stanoven maximální nárůst teploty na 16 °C/min. Po určení konstanty nárůstu, dojde k přepočtu této konstanty společně s požadovaným nárůstem na procentuální vyjádření potřebného výkonu. Poté je dopočtena optimální doba zapnutí a vypnutí topných článků.

Funkce výpočet periody

```
#define cas_periody 44
#define cas_konstanta 0.44 // 44s /100

void vypocet_periody(void)
{
    float konstant_max_narust=0;
    uint8_t procenta_vykonu=0;

    // (6.25/100)*85=5.31
    if(prumerna_hod<=80) konstant_max_narust=6.25; //100%
    if(prumerna_hod>80 && prumerna_hod<=160) konstant_max_narust=5.31; //85%
    if(prumerna_hod>160 && prumerna_hod<=300) konstant_max_narust=4.37; //70%
    if(prumerna_hod>300 && prumerna_hod<=450) konstant_max_narust=4.69; //75%
    if(prumerna_hod>450 && prumerna_hod<=540) konstant_max_narust=5; //80%
```

```

if(prumerna_hod>540 && prumerna_hod<=640) konstant_max_narust=5.62; //90%
if(prumerna_hod>640 && prumerna_hod<=690) konstant_max_narust=5.94; //95%
if(prumerna_hod>690) konstant_max_narust=6.25; //100%

procenta_vykonu=(prubeh1_narust*konstant_max_narust);

doba_ON = cas_konstanta * procenta_vykonu;
doba_OFF = cas_periody - doba_ON;
}

```

4.3 Reléový regulátor

Jak bylo zmíněno výše, funkce stabilizace teploty je řešena dvěma způsoby. Prvním způsobem je reléový regulátor, který je popsán v tomto odstavci. Pro představu realizace této funkce bylo níže uvedeno naprogramování vnitřní funkce reléového regulátoru. Vstupem přepočtení funkce je uživatelem zadaná hodnota teploty uložená v paměti procesoru a aktuální měřená hodnota z teplotního senzoru uvnitř pece. Výstupem je doba sepnutí a vypnutí topných článků. Ze vstupních hodnot požadované a měřené teploty je vypočtena rozdílová hodnota v programu označená jako x . Následně je velikost rozdílové hodnoty testována, zda je její hodnota větší nebo menší nule.

Pokud je rozdílová hodnota teploty menší než nula, tedy měřená teplota se pohybuje pod hladinou zadané teploty, je vypočtena procentuální hodnota z nastaveného teplotního okna. Pokud je procentuální hodnota větší než sto procent, je výstupem funkce sepnutí topných článků po celou dobu periody, která pro regulaci byla stanovena na hodnotu pěti sekund. Pokud je procentuální hodnota nižší než sto procent, je vypočtena doba sepnutí a vypnutí topných článků. Tato doba sepnutí se může pohybovat v rozmezí nula až pěti sekund v závislosti na procentuální hodnotě okna. Poté je doba vypnutí dopočtena jako rozdíl doby sepnutí a periody spínání.

Pokud je rozdílová hodnota teploty vyšší než nula, tedy měřená teplota se pohybuje nad hladinou zadané teploty, je doba sepnutí nastavena na hodnotu nula. Tímto způsobem bude teplota v peci pomalu klesat až na hladinu zadanou uživatelem, kde regulátor svými zásahy doreguluje teplotu na požadovanou. Tímto způsobem je možné regulovat teplotu v peci bez velkých překmitů s dostatečnou přesností.

Funkce Reléová regulace

```

void regulace_rele(int zadana_hodnota, int merena_hodnota)
{
    int procenta = 0;
    double konstanta_cas=0.05; // 0.05 je procento z 5s
    int perioda_cas=5;

    x = zadana_hodnota - merena_hodnota;
}

```

```
if (x > 0) // Platí, pokud je teplota měřená nižší než nastavená
{
    procenta = (x/0.5); //Výpočet procentuální hodnoty teplotního okna

    if(procenta >= 100)
    {
        doba_ON_regulator = perioda_cas;
        doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
    }
    if(procenta < 100)
    {
        doba_ON_regulator = konstanta_cas * procenta;
        doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
    }
}
if (x <= 0) // Platí, pokud je teplota nastavená nižší než měřená
{ // V tomto případě vypnout výhřev
    doba_ON_regulator = 0;
    doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
}
}
```

4.4 PID regulátor

Druhým způsobem řešení stabilizace teploty je PID-Reléový regulátor, který je popsán v tomto odstavci. Pro představu realizace této funkce, bylo níže uvedeno naprogramování vnitřní funkce PID-Reléového regulátoru. Tento regulátor vychází ze struktury Reléového regulátoru vylepšeného PID regulátorem. Vstupem přepočtení funkce, je uživatelem zadaná hodnota teploty uložená v paměti procesoru a aktuální měřená hodnota z teplotního senzoru uvnitř pece. Výstupem je doba sepnutí a vypnutí topných článků. Jelikož PID regulátor je regulátorem rozdílové hodnoty s pevnou strukturou, je na začátku funkce vypočtena hodnota rozdílu zadané a měřené teploty. Dále jsou aplikovány výpočetní vztahy pro proporcionální, integrační a derivační složku a výsledná suma těchto složek nám dává hodnotu optimálního regulačního zásahu.

Následná struktura je podobná programu použitého u Reléového regulátoru s rozdílem, že sledovaná hodnota není pouze výsledkem rozdílu požadované a měřené hodnoty teploty, ale je výstupem PID regulátoru. Aplikací tohoto způsobu regulace je možné při správném nastavení konstant proporcionální, integrační a derivační složky PID regulátoru dosáhnout efektivní regulace, bez velkých překmitů s vyšší přesností, než tomu bylo u Reléového regulátoru.

Funkce PID-Reléová regulace

```

void pid (int zadana_hodnota, int merena_hodnota)
{
    int u=0;
    int procenta = 0;
    double konstanta_cas=0.05;           // 0.05 je procento z 5s
    int perioda_cas=5;                   // Doba periody

    x = zadana_hodnota - merena_hodnota;

    proportional = P_gain * x;           // Proporcionalní složka
    integration = I_gain * ((x*delta_t) + ((x_old-x)/2)*delta_t); // Integrační složka
    derivation = D_gain * ((x - x_old)/delta_t); // Derivační složka

    x_old=x;
    u= proportional+integration+derivation; // Výsledná suma PID regulátoru

    if(u < zadana_hodnota)               // Výstup PID je pod hladinou zadané hodnoty
    {                                     // V tomto případě je napájení vypnuto
        doba_ON_regulator=0;
        doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
    }
    if(u > zadana_hodnota)               // Výstup PID je nad hladinou zadané hodnoty
    {                                     // V tomto případě je regulace zapnuta
        procenta = ((u - zadana_hodnota)/0.5); // 1 je 1 procento z okna 100 °C
                                                // Výpočet procentuální hodnoty teplotního okna

        if(procenta >= 100)
        {
            doba_ON_regulator = perioda_cas;
            doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
        }
        if(procenta < 100)
        {
            doba_ON_regulator = konstanta_cas * procenta;
            doba_OFF_regulator = perioda_cas - doba_ON_regulator;
        }
    }
}

```

5 Nastavení profilů

Jedním z požadavků vedoucího práce bylo jednoduché a intuitivní nastavování teplotních profilů, aby s navrhovaným systémem mohla pracovat i osoba bez složitého zaškolení. Z tohoto důvodu bylo nastavování realizováno pomocí jednoduchého tlačítkového uživatelského rozhraní. Komunikace s uživatelem je realizována pomocí barevného LCD displeje a diodového panelu.

Tlačítkový modu se skládá ze čtyř tlačítek. První tlačítko plní funkci vstupu a výstupu z menu. Pokud se uživatel nenachází v menu, je toto tlačítko označeno na displeji jako **MENU**. Stiskem tlačítka se dostaneme do hlavní nabídky nastavení. Pro vystoupení z nabídky menu je možné použít stejné tlačítko, které je již označeno jako **CANCEL**. Druhé tlačítko plní funkci potvrzování a je označeno na displeji jako **OK**. Toto tlačítko můžeme použít pro jakýkoliv výběr v menu či potvrdit nastavenou teplotu, nárůst a čas. Třetí tlačítko je označeno na displeji **šipkou nahoru** a je možné pomocí něho listovat v menu směrem nahoru a zvyšovat nastavovanou hodnotu teploty, nárůstu či času. Čtvrté tlačítko je označeno na displeji **šipkou dolů** a je možné pomocí něho listovat v menu směrem dolů a snižovat nastavovanou hodnotu teploty, nárůstu či času.

Pro snadné nastavování požadované hodnoty, která se u teploty pohybuje řádově ve stovkách °C, je naprogramována funkce zrychlené inkrementace. Při stisku tlačítka šipka ve funkci nastavování teploty se hodnota teploty inkrementuje po jednotkách, pokud je tlačítko stisknuto bez přerušení déle jak deset sekund, hodnota teploty je inkrementována po deseti. Tímto způsobem je doba nastavování hodnoty teploty zkrácena na kratší dobu, která je pro uživatele přívětivější. Při nastavování hodnoty nárůstu teploty je možné nastavení pouze v rozmezí hodnot nula až šestnáct, aby nedošlo k chybnému nastavení.



Obr 5.1 Displej – zobrazení

Po stisku tlačítka **MENU** se nám na displeji objeví nabídka menu, kde máme na výběr způsob regulace. Na výběr máme *PID regulátor* a *Stavový regulátor*. Dále pak možnost *Stop*, která slouží jako hlavní stop tlačítko, kterým se vypne vytápění regulované pece, a vymažou se nastavené teplotní profily. Čtvrtá možnost v menu nabídce je možnost *Zpět*, kterou můžeme použít, pokud chceme z menu vystoupit. Z menu a následujících podmenu lze vystoupit okamžitě pomocí tlačítka **CANCEL**. Dále v textu jsou ukázány a popsány jednotlivé stupně menu.

Struktura menu:

Menu

PID regulace
Stavová regulace
Stop
Zpět

Po výběru zvoleného typu regulace se dostaneme do podmenu a to buď *Vlastní nastavení PID*, nebo *Vlastní nastavení Stavová*. V tomto podmenu je možné nastavit až šest teplotních profilů, které na sebe budou navazovat. Zvolený teplotní profil se rozsvítí na diodovém panelu a rozsvícená dioda signalizuje, že profil je nastavován. Pokud profil nastavíme dobře, dioda zůstane svítit i po opuštění podmenu pro jednotlivé profily. Pokud byl profil nastaven chybně, nebo nebyl uložen a vystoupilo se z něj pomocí možnosti *Zpět* nebo **CANCEL**, dioda zhasne. Po nastavení námi vybraných profilů můžeme regulaci a vytápění pece zapnout možností *Start*. Pokud chceme podmenu opustit, můžeme použít tlačítko *Zpět*.

Vlastní nastavení PID

1. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 2. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 3. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 4. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 5. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 6. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
Start
Zpět

Vlastní nastavení Stavová

1. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 2. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 3. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 4. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 5. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
 6. *Nár* : - *T* : - *Čas* : -
Start
Zpět

V podmenu vlastního nastavení regulátoru jsou nabídnuty dvě možnosti nastavení profilu a to buď *Nárůst teploty*, nebo *Stabilizace teploty*. Volbu *Nárůst teploty* je nutné využít, pokud se požadovaná hodnota teploty má zvyšovat. Volbu *Stabilizace teploty* je nutné využít, pokud požadovaná hodnota teploty má být stabilní. Pokud chceme podmenu opustit, můžeme použít tlačítko *Zpět*.

Výběr PID regulace

Nárůst teploty
 Stabilizace teploty
 Zpět

Výběr Stavové regulace

Nárůst teploty
 Stabilizace teploty
 Zpět

V podmenu *Nastavení nárůstu* je možné nastavit *Teplotu* a požadovaný *Nárůst teploty*. Čas je dopočítán dle nastavení. Možností *Uložit* můžeme uložit nastavené hodnoty a vrátíme se zpět do podmenu výběru teplotního profilu. Pokud chceme podmenu opustit, můžeme použít tlačítko *Zpět*.

Nastavení nárůst

Teplota: 0
Nárůst: 0
Uložit
Zpět

Nastavení nárůst

Teplota: 0
Nárůst: 0
Uložit
Zpět

V podmenu *Nastavení stabilizace* je možné nastavit *Teplotu* a požadovanou dobu trvání stabilizace teploty. Možností *Uložit* můžeme uložit nastavené hodnoty a vystoupíme tím zpět do podmenu výběru teplotního profilu. Pokud chceme podmenu opustit, můžeme použít tlačítko *Zpět*.

Nastavení stabilizace

Teplota: 0
Čas: 0
Uložit
Zpět

Nastavení stabilizace

Teplota: 0
Čas: 0
Uložit
Zpět

6 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prostudovat možnosti a technické řešení měření a regulace teploty ve vysokoteplotní tavné peci. Na základě získaných informací provést návrh vhodného algoritmu pro regulační systém s možnostmi nastavení teplotních profilů a nakonec provést realizaci regulačního systému. Celá práce byla rozdělena do jednotlivých kapitol dle obsahu. V jednotlivých kapitolách byly popsány hlavní části návrhu regulačního systému.

Ve druhé kapitole mé diplomové práce byla nastíněna teoretická problematika odporového ohřevu, způsobu měření teploty a použití standardních regulačních systémů pro elektrické laboratorní pece. Prostudováním informací bylo zjištěno, že mezi nejpoužívanější senzory teploty patří odporové teploměry a termoelektrické články. Ze vzájemného porovnání vlastností těchto dvou typů senzorů, byl pro konečné řešení senzoru teploty vybrán termočlánek typu K v ochranném pouzdře. Dále byly prostudovány způsoby regulace využívané u komerčně vyráběných pecí. Mezi nejpoužívanější způsoby regulace lze zařadit reléové a PID regulátory.

Třetí kapitola nazvaná „Technické řešení práce“ se zabývá popisem regulované pece, kompletním návrhem regulačního systému a výběrem hlavních komponentů. Z technického popisu regulované pece vplynuly hlavní požadavky na regulátor a celý regulační systém, jako je reléový způsob spínání topných panelů, umístění senzoru teploty a konstrukční uspořádání elektroniky pro regulaci teploty. Dalším krokem byl návrh regulátoru. Tento návrh byl proveden standardním způsobem, kdy nejprve byla popsána intuitivní představa o navrhovaném systému, která byla potvrzena praktickým měřením regulované pece. Z naměřených hodnot byla vytvořena přechodová charakteristika a vypočtena přechodová funkce pece. Poté byl vybrán způsob regulace. Ze změřených a vypočtených hodnot byly na základě teoretického popisu regulátorů vybrány jako nejvhodnější regulátory Reléový a PID-reléový. Navrženy byly oba dva typy regulátorů a realizovaný systém je duální. Tím je myšleno, že uživatel má možnost výběru, který regulátor chce použít.

Hlavním konstrukčním prvkem regulačního zařízení je mikroprocesor STM32F407vgt6, který byl vybrán z důvodů popsaných v části věnované návrhu elektroniky. V této části je dále popsán výběr jednotlivých komponentů, jako je zesilovač termoelektrického napětí AD597, LCD displej, přídavný teplotní senzor. Dále bylo u jednotlivých prvků uvedeno použité zapojení. Podklady pro výrobu jako např. schéma zapojení, seznamy součástek, navržené tištěné spoje a osazovací plány jsou uvedeny v příloze A pod názvem „Návrh zařízení“ a příloze B nazvané „Seznam součástek“. Dále jsou uvedeny fotografie realizovaného modulu v příloze D nazvané „Fotodokumentace“.

Ve čtvrté kapitole jsem se zabýval programovým vybavením mikroprocesoru. Pro ukázkou byly do této kapitoly vloženy některé zajímavé části programu jako výpočet periody, reléový regulátor, PID-reléový regulátor. Celý program je uložen na přiloženém CD.

V poslední kapitole je popsána obsluha navrženého systému a popis nastavení teplotních profilů.

Navržený regulační systém byl nejprve vyroben jako testovací přípravek. Na tomto testovacím modelu byly odzkoušeny a otestovány všechny funkce vyžadované po konečném regulačním systému. Dále byla provedena měření na regulované peci pro zhodnocení navrženého regulačního řešení. Reléový způsob regulace se dá považovat za akceptovatelný. Při testovacích měření docházelo k minimálnímu prvnímu překmitu při přechodu z funkce nárůstu do funkce regulace. Po překmitu došlo k doregulování na požadovanou hodnotu dostatečně rychle a regulační systém držel stabilně nastavenou hodnotu teploty. Rozkmit okolo nastavené teploty byl maximálně ± 5 °C. PID-reléový regulátor se dá považovat za akceptovatelný způsob regulace při dobrém nastavení PID části regulátoru. Tento typ regulace se proti reléovému regulátoru vyznačuje rychlejším doregulováním na požadovanou hodnotu teploty. PID část regulátoru byla nastavena podle simulací a několika praktických měření. Teplota pro takto nastavený PID regulátor se vždy stabilizovala přibližně 20 °C pod požadovanou hodnotou. Proto bych doporučil odladit PID-reléový způsob regulace na finálním regulačním systému a provést kalibraci termočláňkového teploměru.

Před konečnou aplikací regulačního systému bych doporučil umístit na napájecí část elektroniky vhodný síťový filtr a aplikovat ochranu stíněním na elektronické prvky a vodiče termočláňkového senzoru.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef a kol. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha, SNTL/ALFA, 1985.
- [2] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika. část I, II, Společné základy, elektrické pece odporové*. 2. vyd. Plzeň : VŠSE, 1974.
- [3] *Teplota a její měření* [online]. 2006 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [4] *HW.cz: Měření teploty - kovové odporové senzory teploty* [online]. 2004 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-kovove-odporove-senzory-teploty.html>
- [5] ĎAĎO, Stanislav. *Senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1996, 315 s. ISBN 80-010-1500-9.
- [6] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, Fakulta strojniho inženýrství. *Termoelektrické snímače* [online]. 2003 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka03-06.htm>
- [7] KADLEC, Karel a Miloš KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika: Regulace* [online]. 2005 [cit. 2013-10-12]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F3/F3-ram.htm>
- [8] TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik* [online]. Ostrava, 2005 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm#ma12
- [9] STMICROELECTRONICS. *RM0090 Reference manual: STM32F405xx, STM32F407xx, STM32F415xx and STM32F417xx advanced ARM-based 32-bit MCUs* [online]. 2011 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.scribd.com/doc/89253550/STM32F407xx-Reference-Manual>
- [10] STMICROELECTRONICS. *UM1472 User manual: Discovery kit for STM32F407/417 lines* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf
- [11] STMICROELECTRONICS. *STM32F405xx STM32F407xx: Datasheet - production data* [online]. 2014 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>
- [12] ANALOG DEVICES. *Thermocouple Conditioner and Serpoint Controller: AD596/AD597* [online]. 1998 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD596_597.pdf
- [13] CRYDOM. *Crydom-Panel mount: Solid state rele* [online]. 2013 [cit. 2014-04-28]. Dostupné z: http://www.crydom.com/en/products/catalog/s_1.pdf
- [14] TŮMA, František. *Teorie řízení*. 5., dopl. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009, 215 s. ISBN 978-80-7043-819-0.

SEZNAM PŘÍLOH

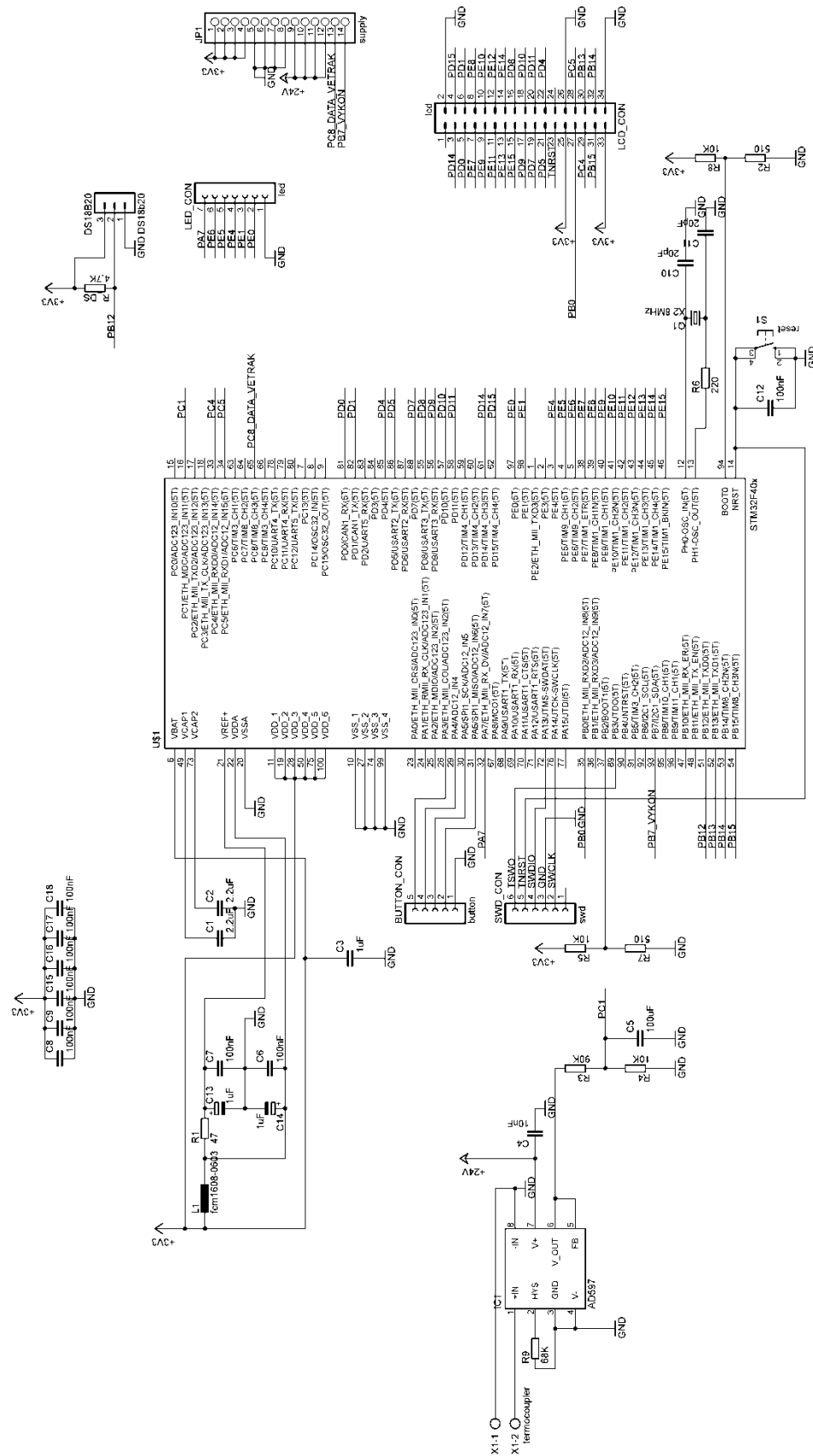
A Návrh zařízení	3
<i>A.1 Obvodové zapojení – Hlavní deska</i>	3
A1.1 Deska plošného spoje – TOP	4
A1.2 Deska plošného spoje – BOTTOM	4
A1.3 Osazovací plán – TOP	5
A1.4 Osazovací plán – BOTTOM	5
<i>A.2 Obvodové zapojení – Zdrojová deska</i>	6
A2.1 Deska plošného spoje – TOP	7
A2.2 Deska plošného spoje – BOTTOM	7
A2.3 Osazovací plán – TOP	8
A2.4 Osazovací plán – BOTTOM	8
<i>A.3 Obvodové zapojení – Signalizační panel</i>	9
A3.1 Deska plošného spoje – TOP	9
A3.2 Deska plošného spoje – BOTTOM	9
A3.3 Osazovací plán – TOP	9
<i>A.4 Obvodové zapojení – Ovládací panel</i>	10
A4.1 Deska plošného spoje – TOP	10
A4.2 Deska plošného spoje – BOTTOM	10
A4.3 Osazovací plán – TOP	10
A4.4 Osazovací plán – BOTTOM	10
B Seznam součástí	11
B.1 Seznam součástí – Hlavní deska	11
B.2 Seznam součástí – Zdrojová deska	12
B.3 Seznam součástí – Signalizační panel	13
B.4 Seznam součástí – Ovládací panel	13
C Konstrukce	14
C.1 Přední panel - Deska	14
C.2 Přední panel - Polep	15

D Fotodokumentace	16
D.1 Hlavní deska	16
D.2 Zdrojová deska	16
D.3 Kompletní modul - 1	17
D.4 Kompletní modul - 2	17
D.5 Ovládací deska	18
D.6 Signalizační deska	18
D.7 Kompletní spojení jednotlivých částí	19
D.8 Přední panel	19

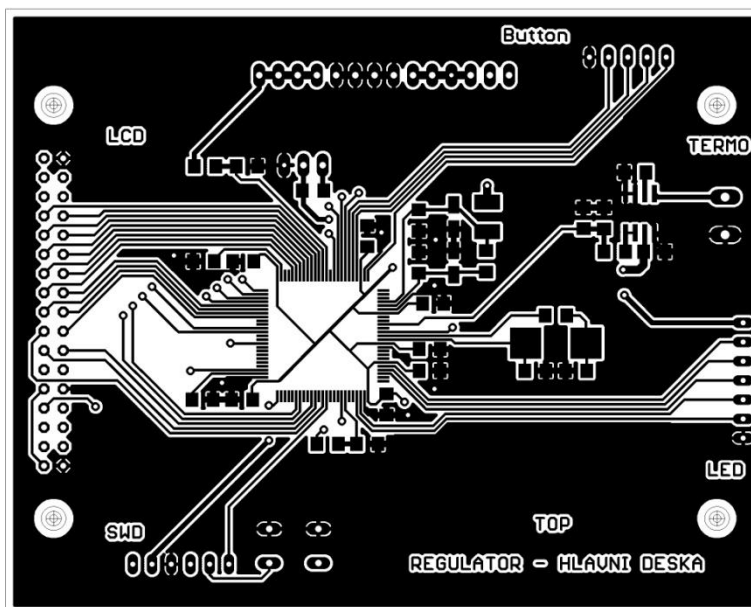
Přílohy

A Návrh zařízení

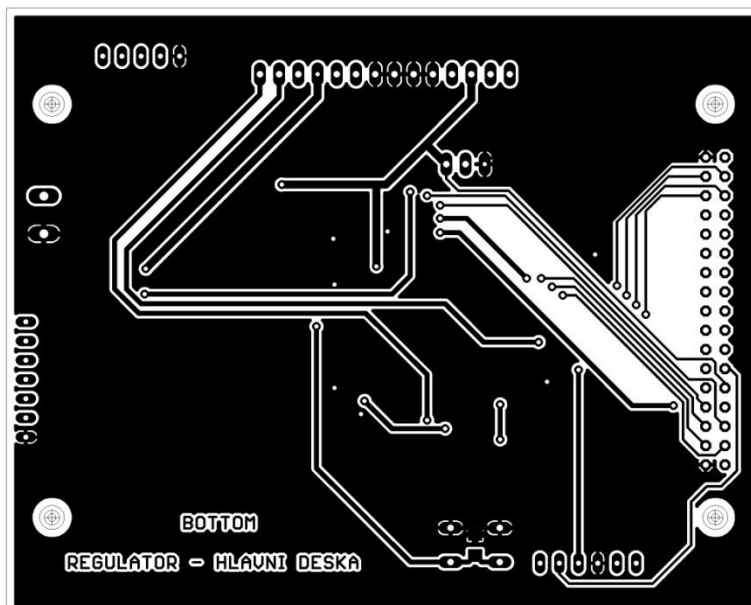
A.1 Obvodové zapojení – Hlavní deska



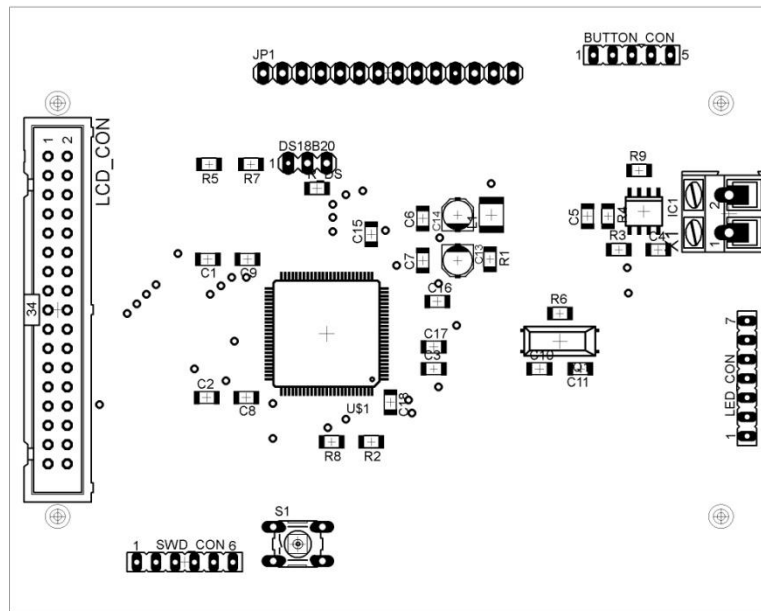
A1.1 Deska plošného spoje – TOP



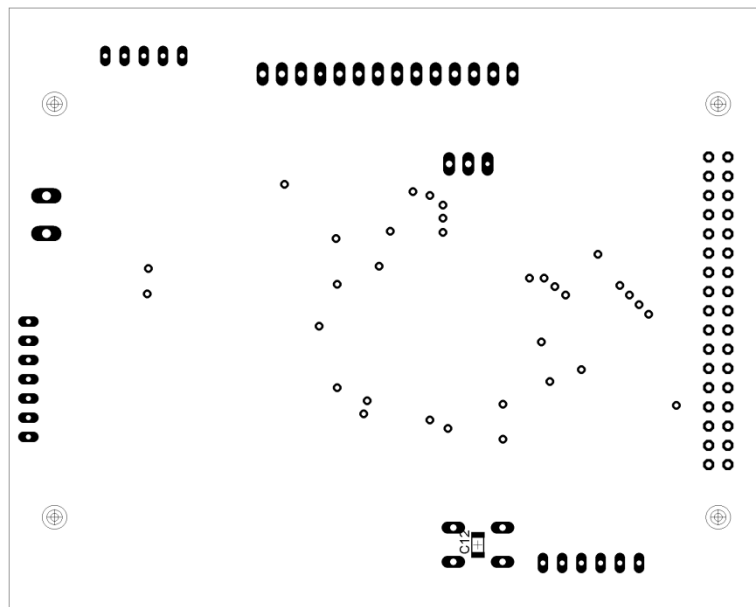
A1.2 Deska plošného spoje – BOTTOM



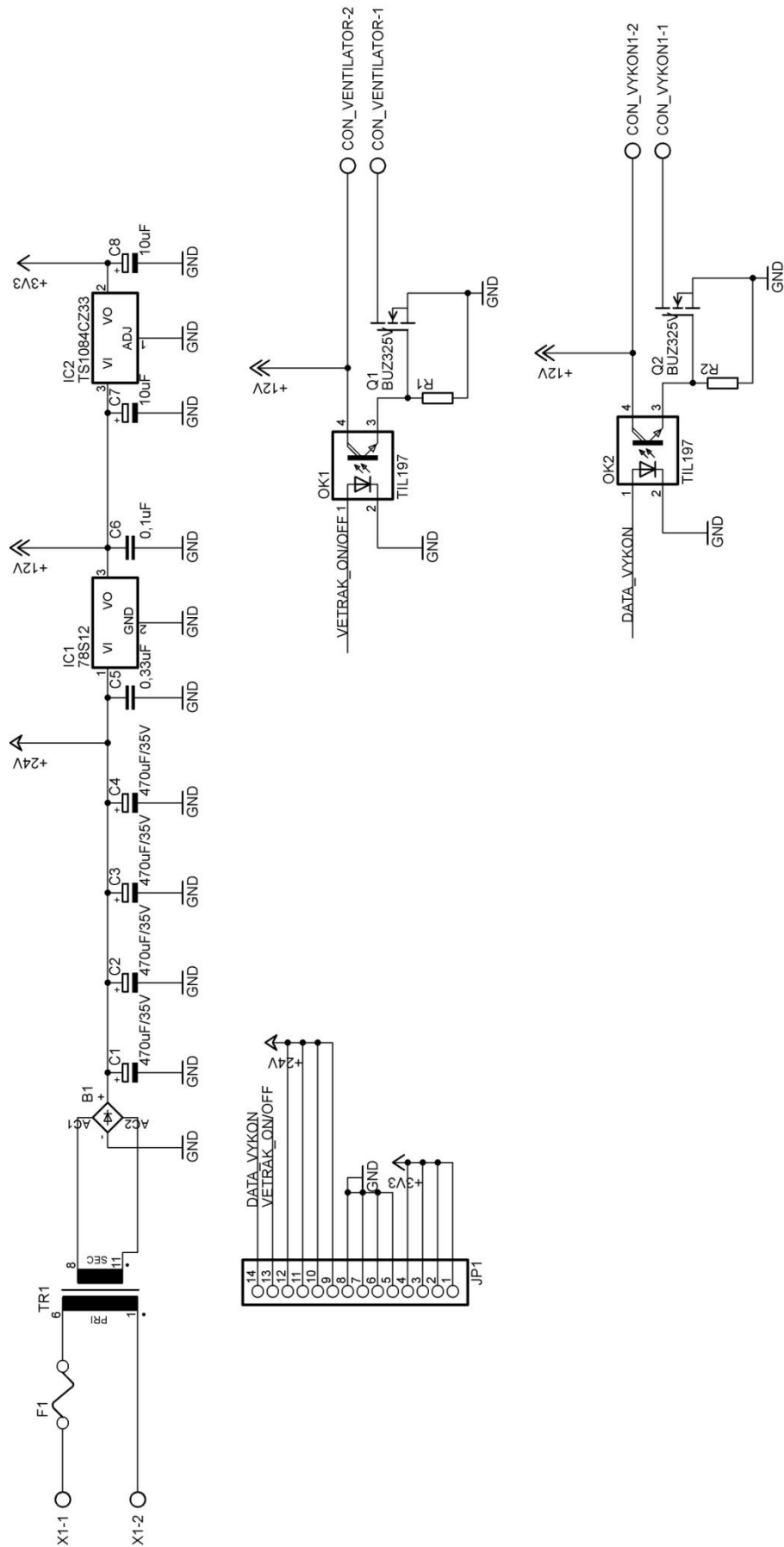
A1.3 Osazovací plán – TOP



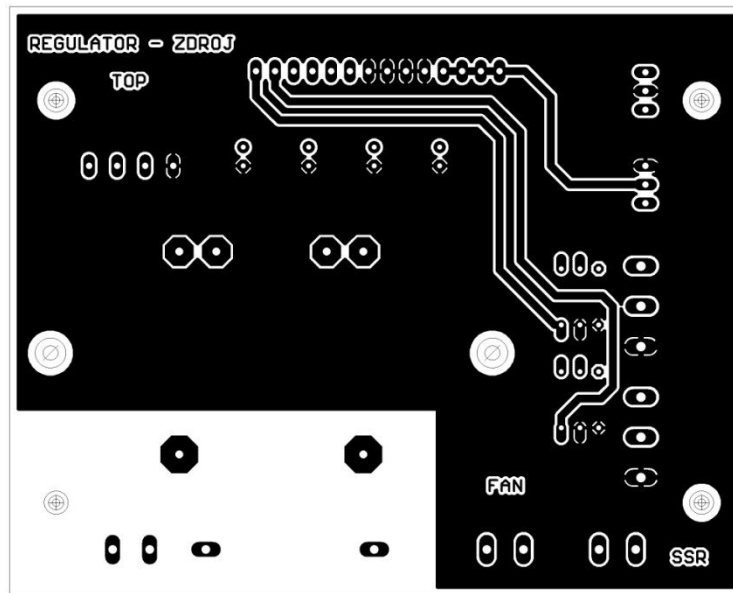
A1.4 Osazovací plán – BOTTOM



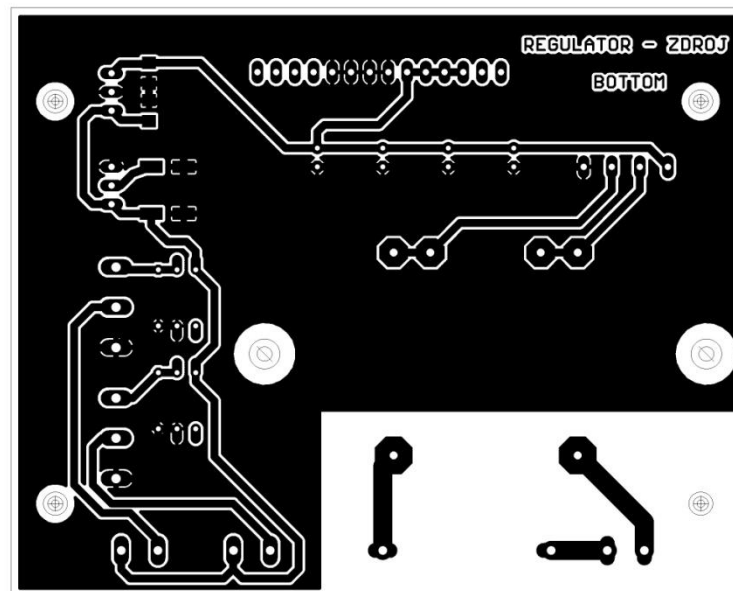
A.2 Obvodové zapojení – Zdrojová deska



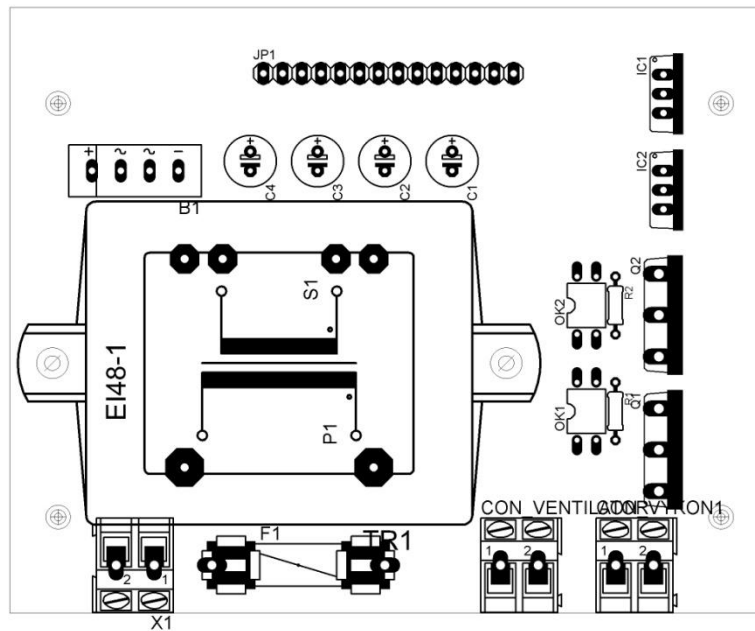
A2.1 Deska plošného spoje – TOP



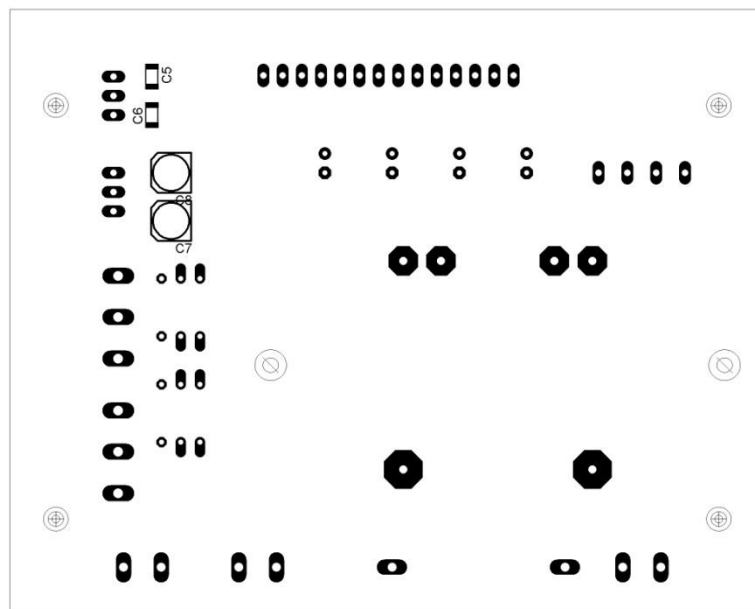
A2.1 Deska plošného spoje – BOTTOM



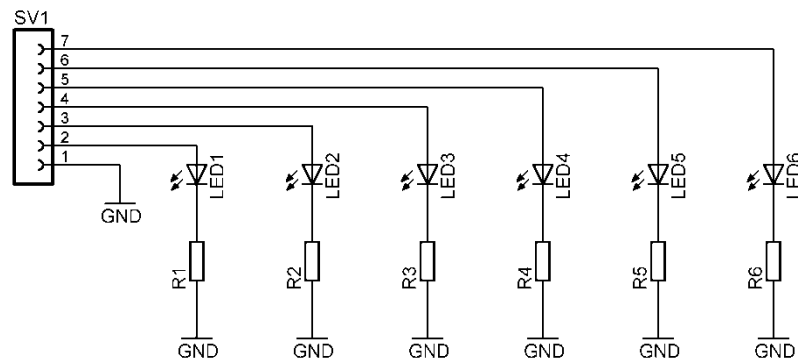
A2.3 Osazovací plán – TOP



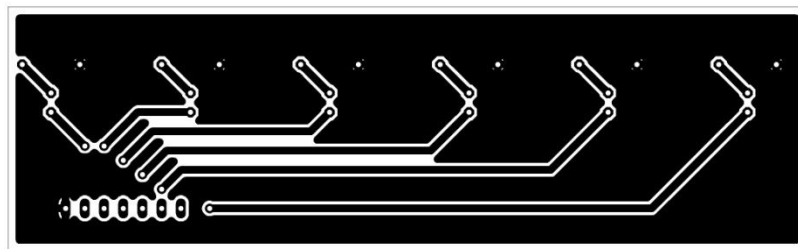
A2.4 Osazovací plán – BOTTOM



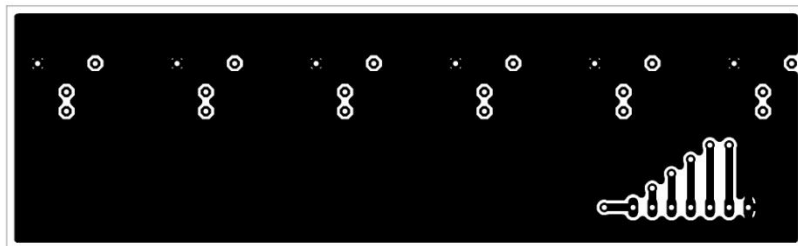
A.3 Obvodové zapojení – Signalizační panel



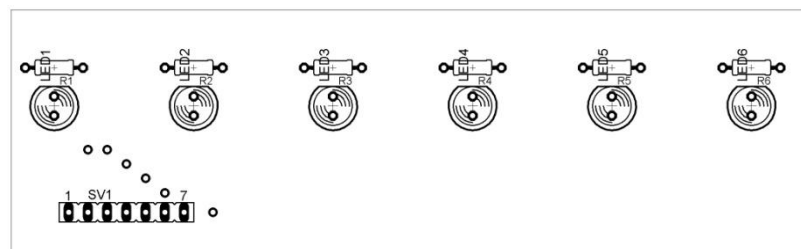
A3.1 Deska plošného spoje – TOP



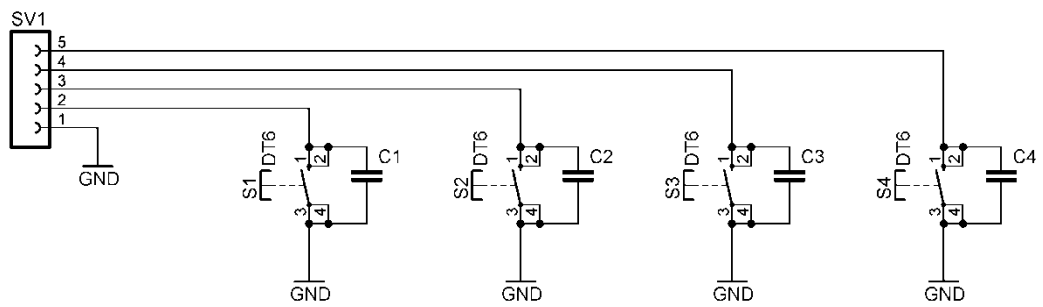
A3.2 Deska plošného spoje – BOTTOM



A3.3 Osazovací plán – TOP



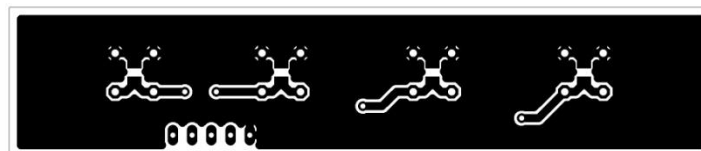
A.4 Obvodové zapojení – Ovládací panel



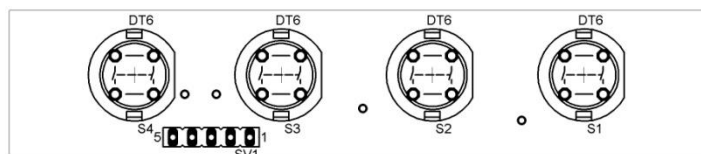
A4.1 Deska plošného spoje – TOP



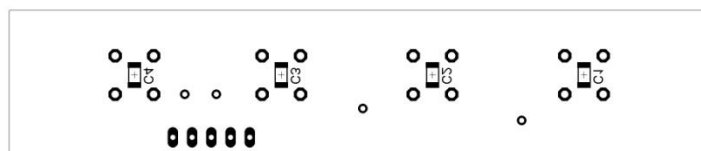
A4.2 Deska plošného spoje – BOTTOM



A4.3 Osazovací plán – TOP



A4.3 Osazovací plán – BOTTOM



B Seznam součástek**B.1 Seznam součástek – Hlavní deska**

Označení	Typ	Hodnota	Pouzdro
Button_con	Svorkovnice	-	FE05
LCD_con	Svorkovnice	-	ML34
LED_con	Svorkovnice	-	FE07
SWD_con	Svorkovnice	-	FE06
C1	Keramický SMD	2,2uF	C1206
C2	Keramický SMD	2,2uF	C1206
C3	Keramický SMD	1uF	C1206
C4	Keramický SMD	10nF	C1206
C5	Keramický SMD	100nF	C1206
C6	Keramický SMD	100nF	C1206
C7	Keramický SMD	100nF	C1206
C8	Keramický SMD	100nF	C1206
C9	Keramický SMD	100nF	C1206
C10	Keramický SMD	20pF	C1206
C11	Keramický SMD	20pF	C1206
C12	Keramický SMD	100nF	C1206
C13	Elektrolytický SMD	1uF	153CLV-0505
C14	Elektrolytický SMD	1uF	153CLV-0505
C15	Keramický SMD	100nF	C1206
C16	Keramický SMD	100nF	C1206
C17	Keramický SMD	100nF	C1206
C18	Keramický SMD	100nF	C1206
DS18b20	Senzor teploty	DS18b20	MA03-1
IC1	Termočlánkový zesilovač	AD597	SO8
JP1	Svorkovnice	-	1x14
L1	Cívka SMD	FCM1608-0603	L1812
Q1	Krystal SMD	8MHz	MC-405
R1	Rezistor SMD	47R	R1206
R2	Rezistor SMD	510R	R1206
R3	Rezistor SMD	50K	R1206
R4	Rezistor SMD	10K	R1206
R5	Rezistor SMD	10K	R1206
R6	Rezistor SMD	220R	R1206
R7	Rezistor SMD	510R	R1206
R8	Rezistor SMD	10K	R1206
R9	Rezistor SMD		R1206
R_DS	Rezistor SMD	4,7K	R1206
S1	Tlačítko	-	B3F-10xx
U\$1	Mikroprocesor	STM32F407VGT6	100LQFP
X1	Svorkovnice	-	AK500/2

B.2 Seznam součástek – Zdrojová deska

Označení	Typ	Hodnota	Pouzdro
B1	Můstkový usměrňovač		2KBP
C1	Elektrolyt	470uF/35V	E-2,5-7
C2	Elektrolyt	470uF/35V	E-2,5-7
C3	Elektrolyt	470uF/35V	E-2,5-7
C4	Elektrolyt	470uF/35V	E-2,5-7
C5	Keramický SMD	0,33uF	C1205
C6	Keramický SMD	0,1uF	C1205
C7	Elektrolyt SMD	10uF	153CLV-0505
C8	Elektrolyt SMD	10uF	153CLV-0505
R1	Rezistor THT		0204/7
R2	Rezistor THT		0204/7
Q1	Tranzistor FET	IRF3710ZPBF - MOSFET	TO218V
Q2	Tranzistor FET	IRF3710ZPBF - MOSFET	TO218V
OK1	Optocoupler	SHARP - PC123X1YFZ0F	DIL04
OK2	Optocoupler	SHARP - PC123X1YFZ0F	DIL04
IC1	Stabilizátor	78S12	TO220V
IC2	Stabilizátor	TS1084CZ33OC	TO220V
CON_Ventilator	Svorkovnice	-	AK500/2
CON_Vykon	Svorkovnice	-	AK500/2
X1	Svorkovnice	-	AK500/2
JP1	Svorkovnice	-	1x14
TR1	Transformátor	230V/15V	EI48-1B
F1	Pojistka	-	FUSE

B.3 Seznam součástek – Signalizační panel

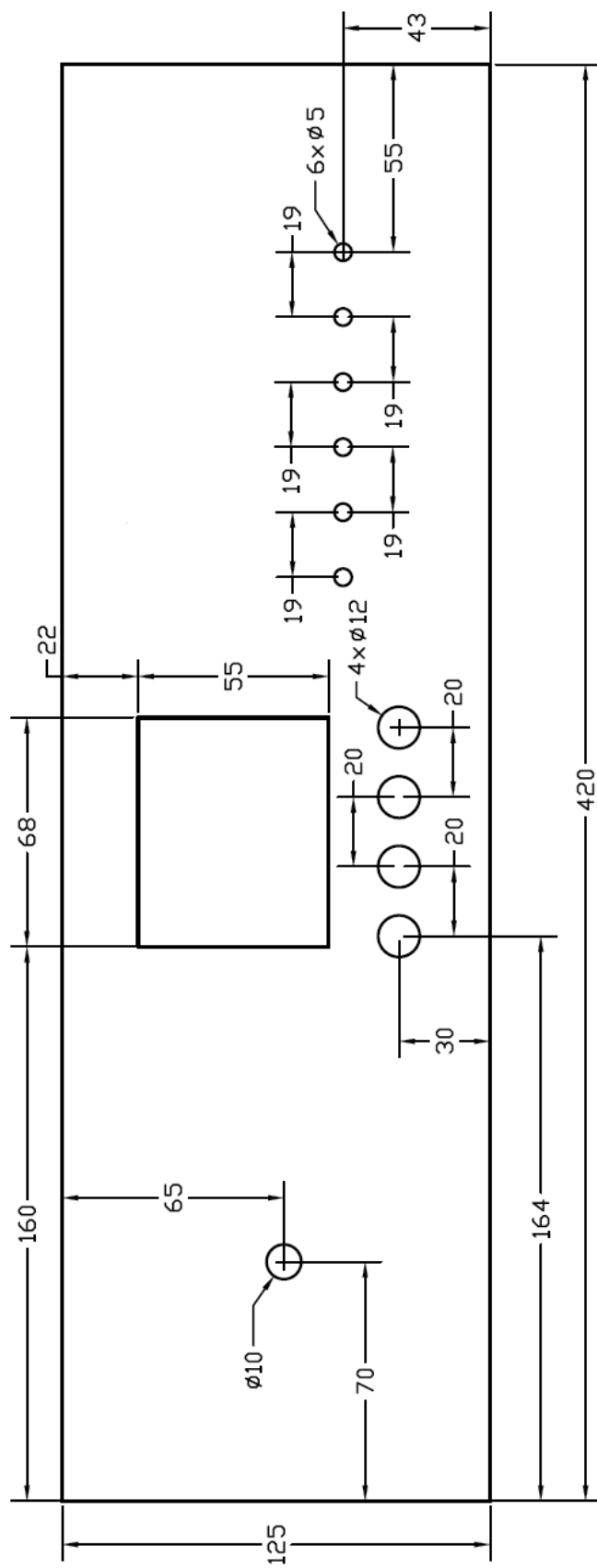
Označení	Typ	Hodnota	Pouzdro
LED1	Dioda - LED	-	LED5MM
LED2	Dioda - LED	-	LED5MM
LED3	Dioda - LED	-	LED5MM
LED4	Dioda - LED	-	LED5MM
LED5	Dioda - LED	-	LED5MM
LED6	Dioda - LED	-	LED5MM
R1	Rezistor	150R	0204/7
R2	Rezistor	150R	0204/7
R3	Rezistor	150R	0204/7
R4	Rezistor	150R	0204/7
R5	Rezistor	150R	0204/7
R6	Rezistor	150R	0204/7
SV1	Svorkovnice	-	FE07

B.4 Seznam součástek – Ovládací panel

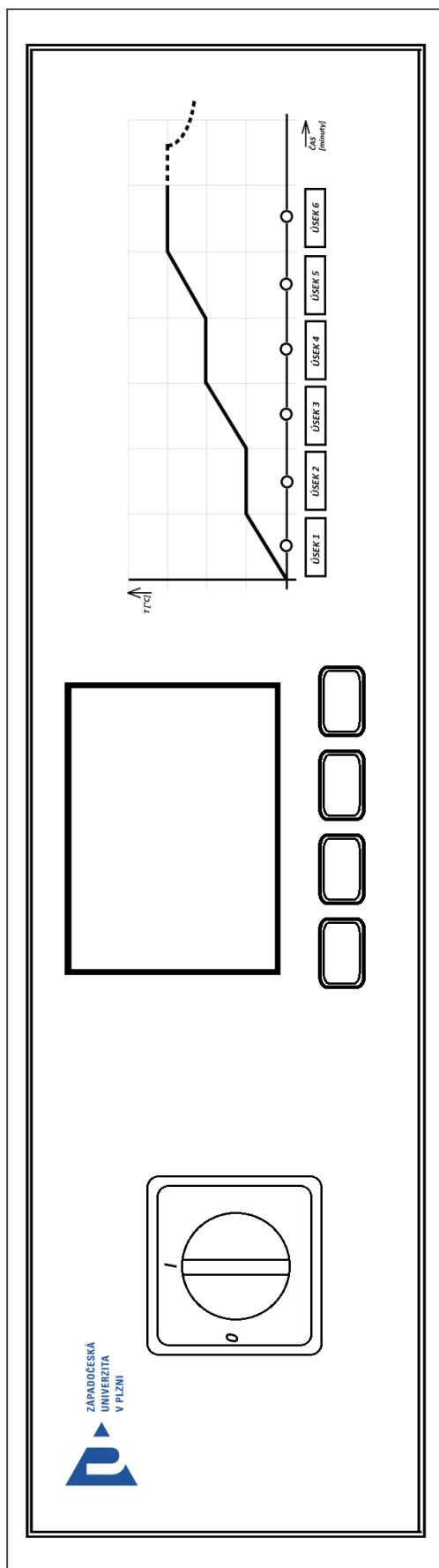
Označení	Typ	Hodnota	Pouzdro
C1	Keramický SMD	100nF	C1206
C2	Keramický SMD	100nF	C1206
C3	Keramický SMD	100nF	C1206
C4	Keramický SMD	100nF	C1206
S1	Tlačítko	-	KS01-B
S2	Tlačítko	-	KS01-B
S3	Tlačítko	-	KS01-B
S4	Tlačítko	-	KS01-B
SV1	Svorkovnice	-	FE05

C Konstrukce

C.1 Přední Panel – Deska

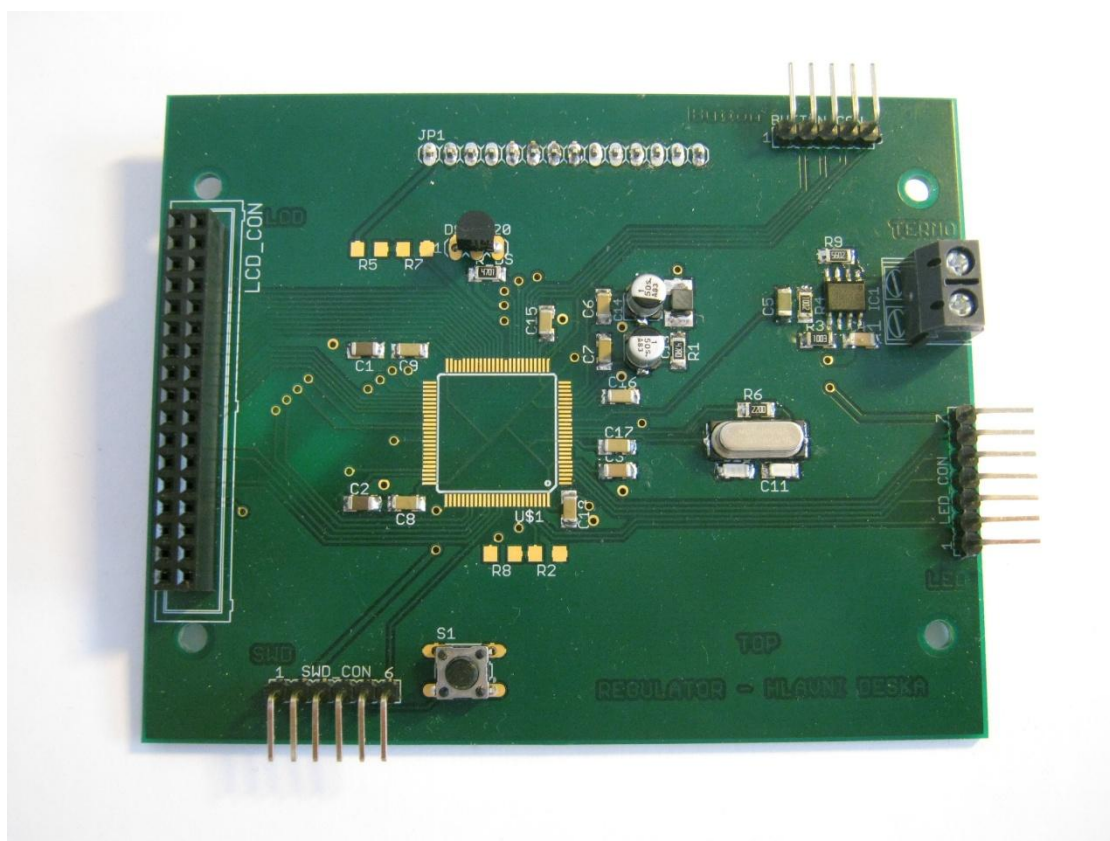


C.2 Přední Panel – Polep

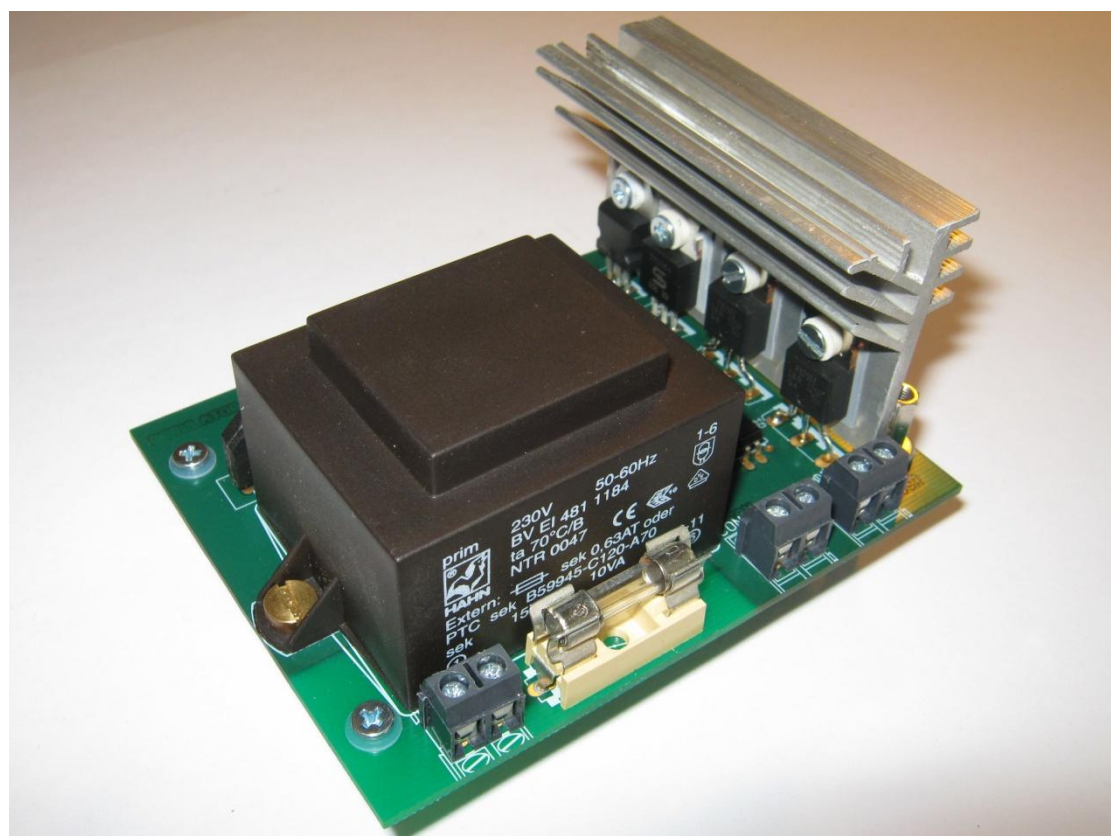


D Fotodokumentace

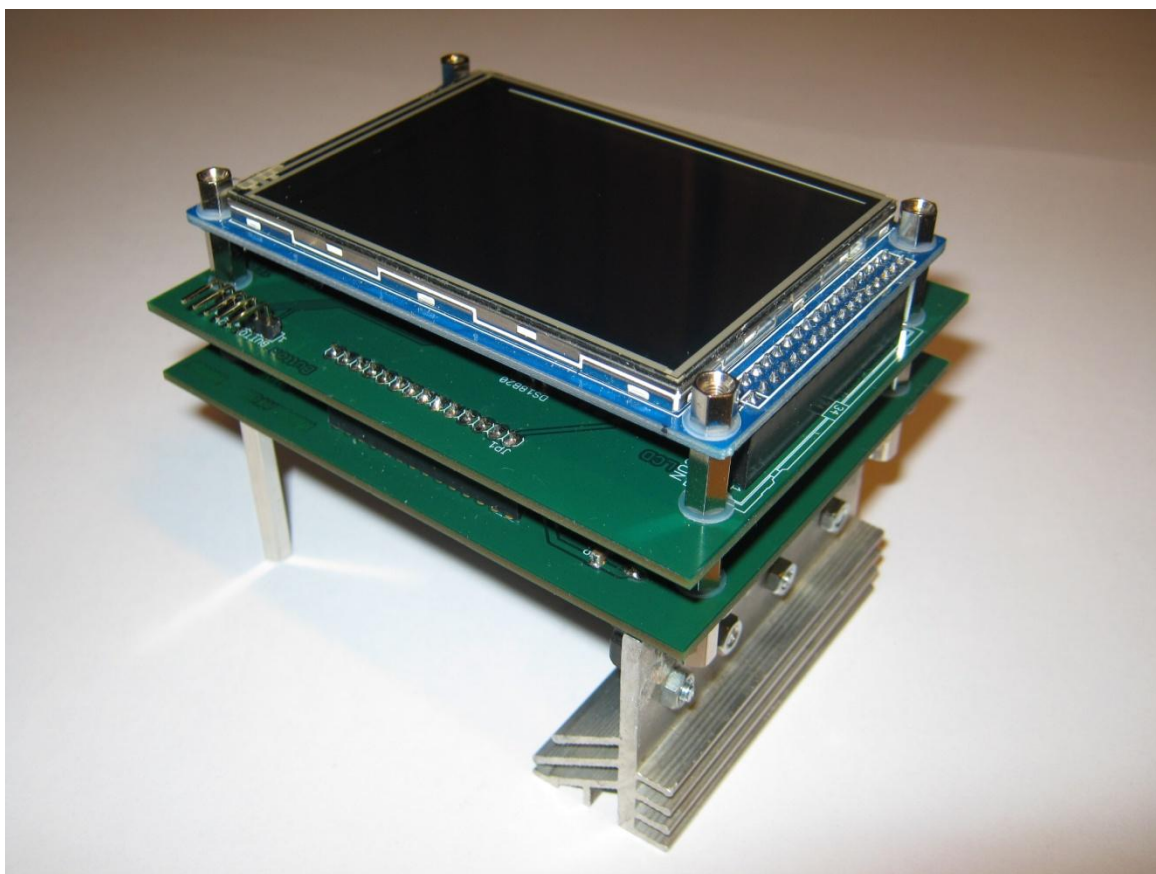
D.1 Hlavní deska



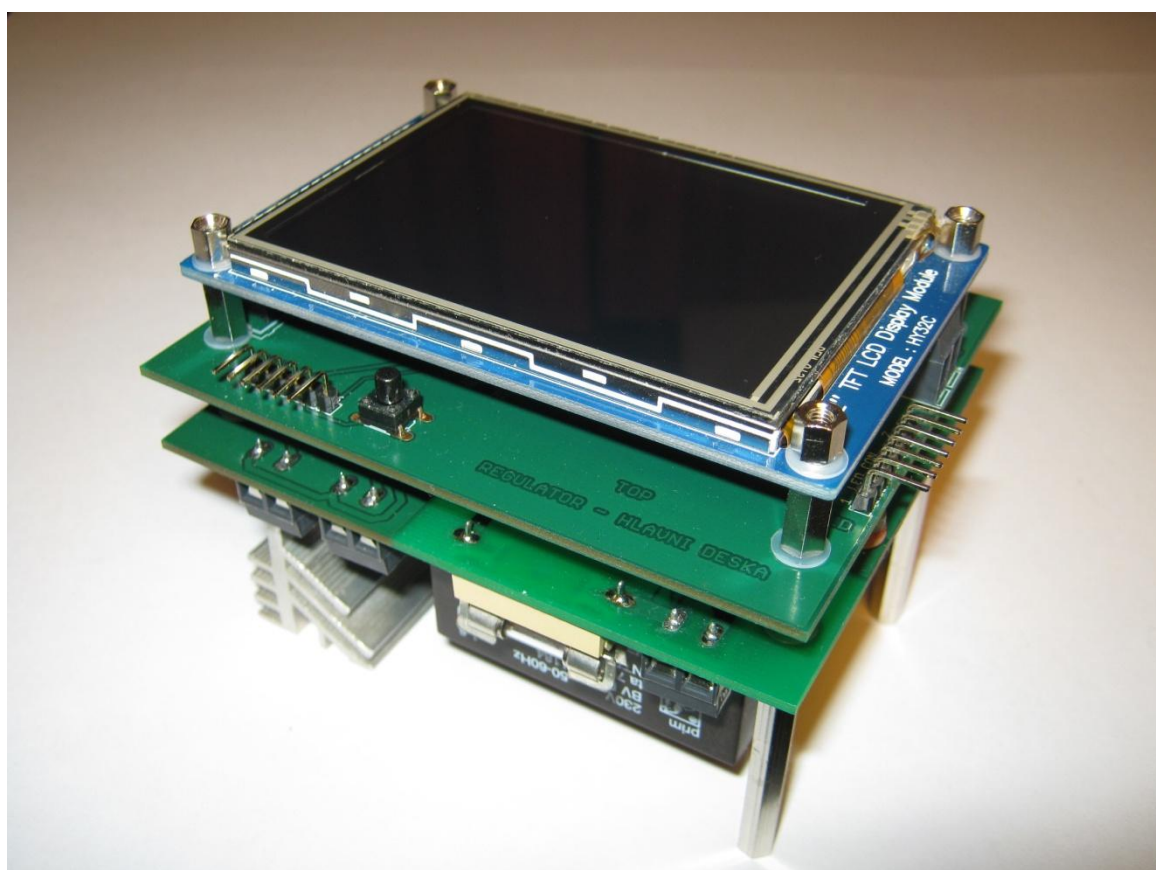
D.2 Zdrojová deska



D.3 Kompletní modul - 1



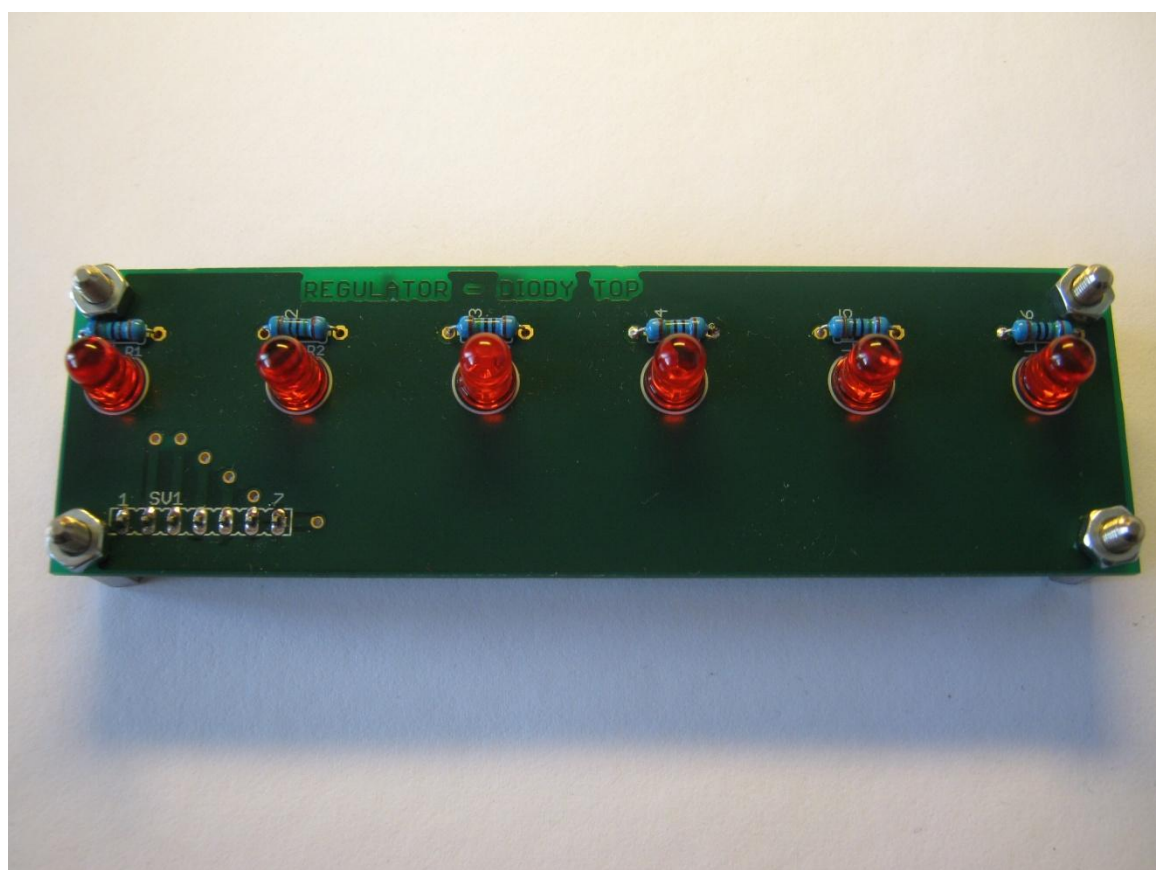
D.4 Kompletní modul - 2



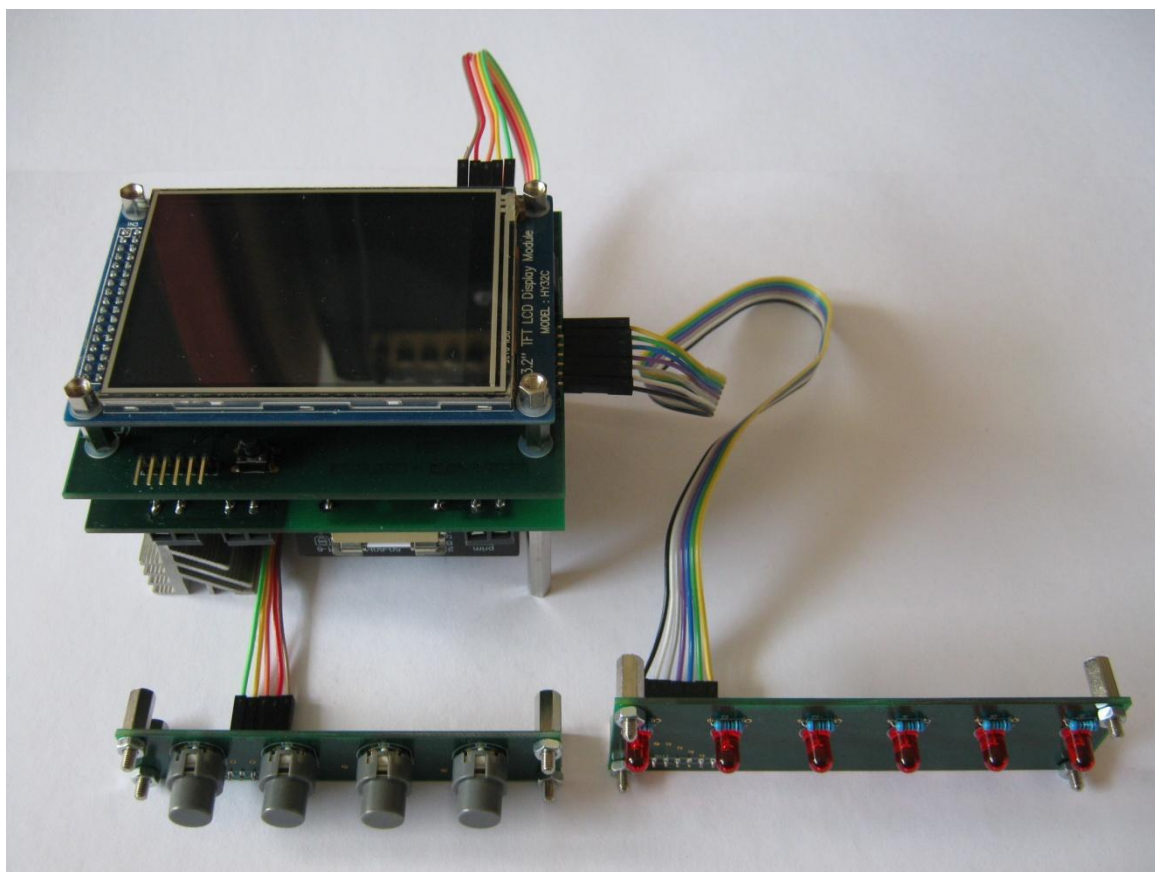
D.5 Ovládací deska



D.6 Signalizační deska



D.7 Kompletní spojení jednotlivých částí



D.8 Přední panel

