VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRŮMYSLOVÉ VYPALOVACÍ PECE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

STANISLAV AUGUSTIN

BRNO 2013

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRŮMYSLOVÉ VYPALOVACÍ PECE

CONTROL UNIT FOR AN INDUSTRIAL CONVECTION OVEN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — STANISLAV AUGUSTIN

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2013

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Stanislav Augustin	***ID:***	88554
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Řídicí jednotka průmyslové vypalovací pece

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci a schéma zapojení jednotky pro řízení procesu vypalování laku při výrobě transformátorů. Jednotka bude obsahovat jednoduchý panel řízení a indikace stavu zařízení. Navrženou jednotku realizujte a ověřte její vlastnosti. Vzhledem k plánovanému použití v průmyslovém provozu věnujte pozornost spolehlivosti a kvalitnímu mechanickému provedení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ŠEDA, M., ŠVARC, I., VÍTEČKOVÁ, M Automatické řízení. 1. vydání. Praha: CERM, 2007.

[2] KRIEDL, M., Měření teploty – senzory a měřicí obvody. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 2005.

[3] KREJČIŘÍK, A. Moderní spínané zdroje, 1. vydání. BEN - technická literatura, Praha, 1999

Termín zadání:	11.2.2013	***Termín odevzdání:***	31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Obsahem této bakalářské práce je návrh a realizace řídící jednotky vypalovací pece pro prototypovou výrobu transformátorů pro svařovací techniku a ověřit její vlastnosti. Řídící jednotka musí být schopna regulovat teplotu prostředí uvnitř komory vypalovací pece za pomocí řízení příkonu topných elementů (např. topných tyčí), které jsou v této komoře osazeny.

KLÍČOVÁ SLOVA

vypalovací pec, teplotní regulace, výroba transformátorů

ABSTRACT

The contents of this bachelor thesis is to design and realization of controll unit for convection oven for prototype transformers production for welding technology and design a scheme of the unit. The controll unit must be able to regulate the ambient temperature inside the oven using a power management of heating elements (for example heating rail) inside the oven.

KEYWORDS

convection oven, temperature regulation, transformers production

AUGUSTIN, Stanislav *Řídící jednotka průmyslové vypalovací pece*: bakalářská práce. V Brně 29. května 2013: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2013. 67 s. Vedoucí práce byl Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně 29. května 2013 .....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Michalovi Kubíčkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále děkuji panu Michalovi Šperlovi za pomoc při konstrukci mechanické podoby vypalovací pece a její řídící jednotky.

V Brně 29. května 2013 .....

(podpis autora)

OBSAH

1 Úvod **12**
1.1 Použití pece . . . 12
1.2 Parametry laků . . . 12
1.3 Požadavky na pec a řídící jednotku . . . 12
1.4 Parametry pece a řídící jednotky . . . 13

2 Návrh řídící jednotky pece **15**
2.1 Parametry elektrické přípojky . . . 15
2.2 Napájecí zdroj . . . 15
2.2.1 Kontrola parametrů transformátoru . . . 16
2.2.2 Návrh usměrňovače . . . 17
2.2.3 Návrh filtračních kondenzátorů . . . 17
2.2.4 Návrh stabilizátorů . . . 18
2.3 Řídící část . . . 21
2.3.1 Časování a reset mikrokontroléru . . . 21
2.3.2 Programování paměti mikrokontroléru . . . 22
2.3.3 Sériová EEPROM . . . 22
2.3.4 Obvod reálného času - RTC . . . 23
2.3.5 USB . . . 23
2.3.6 PSD regulátor . . . 25
2.4 Ovládací, indikační a zobrazovací část . . . 26
2.4.1 Dotyková plocha . . . 26
2.4.2 Displej . . . 30
2.5 Měřící část . . . 32
2.5.1 Přehled měřících metod, parametry měření . . . 32
2.5.2 Integrovaný obvod s vnitřním snímačem . . . 33
2.5.3 Rezistivní snímač . . . 33
2.5.4 Křemíkový snímač . . . 33
2.5.5 Termočlánek . . . 34
2.5.6 Porovnání snímačů, výběr vhodné varianty . . . 34
2.5.7 Měřící převodník . . . 35
2.6 Výkonová část . . . 37
2.6.1 Změna amplitudy napájecího napětí . . . 37
2.6.2 Sine wave dimming . . . 38
2.6.3 Propuštěním pouze částí půlvln proudu . . . 39
2.6.4 Střídavé propuštění a zadržování půlvln proudu . . . 40
2.6.5 Volba řešení . . . 40

2.7 Mechanické provedení řídící jednotky 41

3 Program **44**

3.1 Jazyk, vývojové prostředí 44
3.2 Obsluha LCD displeje 44
3.3 Obsluha sběrnice I^2C 44
3.4 Obsluha dotykového panelu 45
3.5 Obsluha měřícího převodníku 46
3.6 PSD regulátor 46

4 Závěr **48**

Literatura **49**

Seznam příloh **52**

A Schéma zapojení jednotky **53**

B Rozpisky součástek **57**

C Osazovací výkresy **60**

D Motivy DPS **62**

E Podoba vypalovací pece **66**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Vypalovací pec . . . 13
1.2 Vypalovací pec . . . 13
2.1 Schéma napájecího zdroje jednotky . . . 15
2.2 Zapojení spínaného stabilizátoru napětí . . . 18
2.3 Graf pro určení indukčnosti L1 pomocí E·T konstanty, zdroj: [3] . . . 20
2.4 Zapojení nízkoúbytkového stabilizátoru napětí . . . 20
2.5 Obvod pro reset mikrokontroléru . . . 21
2.6 Sběrnice pro programování paměti mikrokontroléru . . . 22
2.7 Zapojení paměti EEPROM . . . 23
2.8 Zapojení obvodu reálného času . . . 23
2.9 Zapojení obvodu pro komunikaci po USB . . . 24
2.10 Konstrukce dotykové plochy . . . 27
2.11 Čtyřvodičové zapojení dotykové plochy . . . 27
2.12 Určení místa stisku dotykové plochy a) ve směru osy y, b) ve směru osy x . . . 28
2.13 Instalace dotykové plochy na LCD displej . . . 28
2.14 Blokové schéma obvodu TSC2003IPWR, převzato z [17] . . . 29
2.15 Zapojení obvodu TSC2003IPWR pro řízení dotykového panelu . . . 30
2.16 Zapojení modulu LCD displeje . . . 31
2.17 Zdroj pro podsvícení LCD . . . 32
2.18 Termočlánek . . . 34
2.19 Zapojení měřícího převodníku MAX31855 . . . 36
2.20 Zapojení převodníku napěťových úrovní . . . 37
2.21 Řízení příkonu pomocí změny amplitudy napětí . . . 38
2.22 Řízení příkonu pomocí techniky sine wave dimming . . . 39
2.23 Fázové řízení . . . 39
2.24 Střídavé propouštění půlvln napájecího proudu . . . 40
2.25 Jeden kanál výkonové části řídící jednotky . . . 41
2.26 Komplet desek plošných spojů . . . 42
2.27 Komplet desek plošných spojů . . . 42
3.1 Provoz na sběrnici I^2C . . . 44
3.2 Adresa obvodu TSC2003 na I^2C . . . 45
3.3 Řídící slovo obvodu TSC2003 . . . 45
3.4 Průběh signálu na sběrnici SPI . . . 46
C.1 Osazovací výkres plošného spoje RJ-2.0 . . . 60
C.2 Osazovací výkres plošného spoje TR-1.0 . . . 61
D.1 Motiv plošného spoje RJ-2.0 - strana top . . . 62

D.2 Motiv plošného spoje RJ-2.0 - strana bottom 63
D.3 Motiv plošného spoje TR-1.0 - strana top 64
D.4 Motiv plošného spoje TR-1.0 - strana bottom 65
E.1 Vypalovací pec 66
E.2 Vypalovací pec 66
E.3 Řídící jednotka 67

SEZNAM TABULEK

2.1 Proudová spotřeba jednotlivých částí jednotky 16
2.2 Parametry stávajícího síťového transformátoru 16
2.3 Řídící signály LCD displeje 31
2.4 Přehled teplotních snímačů 34
B.1 Rozpiska součástek DPS RJ-2.0 57
B.2 Rozpiska součástek DPS RJ-2.0 - pokračování 58
B.3 Rozpiska součástek DPS TR-1.0 59

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu řídící jednotky vypalovací pece pro prototypovou výrobu transformátorů ve firmě, věnující se výrobě svařovací techniky (firma si nepřeje být jmenována). Potřeba vývoje podobného zařízení vznikla především kvůli chybějící flexibilitě při prototypovém vývoji vinutých dílů. Tato pec by měla vhodně doplňovat stávající technologické zařízení firmy. Firma vlastní pec pro sériovou výrobu transformátorů, tato pec má vnitřní rozměry 2 m x 2 m x 2 m. Její provoz je z důvodu ekonomičnosti předem naplánován a její rychlé použití pro prototypovou výrobu tak není možné. Firma tedy měla zájem o vývoj pece, která bude odpovídat požadavkům prototypového vývoje.

1.1 Použití pece

Vypalovací pec pro vypalování transformátorů slouží k vytvrzení tepelně tvrditelných laků, které jsou při výrobě transformátorů použity k mechanické fixaci vinutí a k jejich doplňkové elektrické izolaci. V případě transformátoru s kovovým (plechovým) jádrem tvoří lak také ochranu jádra před účinky vzdušné vlhkosti.

1.2 Parametry laků

Teploty, při kterých jsou běžně používané laky vytvrzovány, se pohybují okolo 80 °C až 120 °C a doba potřebná k vytvrzení laku se pohybuje od dvou do osmi hodin. Většina laků nevyžaduje v čase proměnnou teplotu vytvrzování (teplotní profil), avšak řídící jednotka pece s touto možností počítá. Laky, použité pro impregnaci transformátorů a dalších vinutých dílů v elektrotechnice, není nutné vytvrzovat v nevýbušném prostředí. To velmi zjednodušuje mechanický návrh celé pece.

1.3 Požadavky na pec a řídící jednotku

Vzhledem k použití pece především při prototypové a malosériové výrobě musí pec splňovat několik specifických požadavků:

- Mobilita
- Připojení k jednofázovému rozvodu s jištěním 16 A
- Dostatečný výkon k dosažení maximální teploty 250 °C
- Dostatečně přesná regulace vnitřní teploty
- Zobrazování informací o teplotě uvnitř pece a o průběhu vypalovacího procesu

- Ruční zadání parametrů teplotního profilu i zadání profilu pomocí zařízení připojeného přes sběrnici USB

1.4 Parametry pece a řídící jednotky

Na Obr. 1.1 a 1.2je vzhled a mechanické uspořádání vypalovací pece a její řídící jednotky.

Obr. 1.1: Vypalovací pec

Obr. 1.2: Vypalovací pec

Vnitřní prostor pece je z důvodu zamezení tepelných ztrát a z důvodu vytvoření tepelné izolace mezi vnitřním prostorem a šasi pece vyložen tepelně izolačními bloky

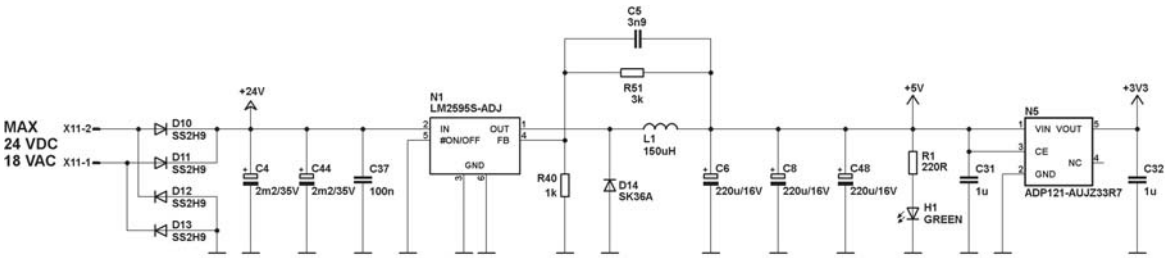
z keramiky. Maximální teplota, které je možné v peci trvale dosáhnout je 250 °C. Řídící jednotka je schopna zpracovat signál z teplotního čidla - termočlánku - a regulovat teplotu uvnitř pece tak, aby se co nejvíce shodovala s požadovanou nastavenou teplotou. Vypalovací pec je určena především pro potřeby vývoje nových typů transformátorů, případně pro výrobu malých sérií menších typů transformátorů a ostatních vinutých dílů pro svařovací techniku. Tomu odpovídají také rozměry vnitřního prostoru vypalovací pece 700 mm x 500 mm x 500 mm. V zadní stěně vnitřního prostoru pece jsou osazeny tři topné tyče, každá o maximálním příkonu 1 kW, jejichž aktuální příkon je řízen řídící jednotkou podle aktuální potřeby. Aby byla dosažena co možná nejrovnoměrnější teplota v celém prostoru pece, je do její boční stěny osazen ventilátor, který je spouštěn na pokyn řídící jednotky. Ten zajišťuje dostatečnou cirkulaci vzduchu v peci.

2 NÁVRH ŘÍDÍCÍ JEDNOTKY PECE

2.1 Parametry elektrické přípojky

Celá vypalovací pec je napájena ze střídavého rozvodu 1 x 230 V / 50 Hz, jištění 16 A, charakteristika jističe B. Tomu odpovídá maximální možný příkon připojeného zařízení 3680 W, což pro napájení pece a její řídící jednotky postačuje. K peci je připojena malá rozvodná skříň, ve které jsou umístěny silové komponenty pro rozvod elektrické energie v zařízení. Skříň obsahuje jednofázový jistič (vzhledem k tomu, že jmenovitý proud rozvaděče je menší než 25 A, může tento jistič sloužit zároveň jako hlavní vypínač) a obvody havarijního termostatu a nouzového vypínače celého zařízení. Do samotné řídící jednotky jsou z této rozvodné skříně připojeny fázový a střední vodič síťového přívodu. Celé zařízení je možné ihned vyřadit z provozu stiskem nouzového tlačítka. Obvod havarijního termostatu odpojí pec od sítě v případě, že teplota uvnitř pece přesáhne 300 °C. Tento havarijní termostat je absolutně nezávislý na řídící jednotce pece.

2.2 Napájecí zdroj



Obr. 2.1: Schéma napájecího zdroje jednotky

Celá řídící jednotka je napájena síťovým toroidním jednofázovým transformátorem Talema 58-020-012-B se sekundárním napětím 12 V a jmenovitým sekundárním proudem 1,667 A a napětím naprázdno 13,96 V (transformátor je součástí stávající instalace rozvaděče pece a pro potřeby nové řídící jednotky je plně vyhovující). Střídavé napájecí napětí z transformátoru je usměrněno graetzovým usměrňovačem složeným z diod D10 až D13 a vyhlazeno dvojicí kondenzátorů C4 a C44. Takto upravené stejnosměrné napětí je přivedeno na vstup spínaného stabilizátoru N1 LM2595S-ADJ. Tento stabilizátor pracuje na frekvenci 150 kHz a na svém výstupu udržuje napětí, které je možné nastavit vhodnou kombinací rezistorů R51 a R40.

Tento stabilizátor udržuje na svém výstupu napětí 5 V pro displej, mikrokontrolér a jeho podpůrné obvody, I^2C a SPI zařízení, USB řadič a řídící část výkonových obvodů. Dále je v této napěťové větvi zařazen nízkoúbytkový (tzv. low-drop) lineární stabilizátor ADP121-AUJZ33R7 s výstupním napětím 3,3 V pro napájení převodníku N3. Proudová spotřeba jednotlivých částí a celé jednotky je uvedena v Tab. 2.1.

Část	**Poznámka**	**Spotřeba**
Mikrokontrolér	—	50 mA
Displej	Řadič, podsvícení	200 mA
Výkonová část	Optočleny a SSR	45 mA
Celkem		**295 mA**

Tab. 2.1: Proudová spotřeba jednotlivých částí jednotky

2.2.1 Kontrola parametrů transformátoru

Výkon	**Prim. napětí**	**Sek. napětí**	**Sek. proud**	**Napětí naprázdno**
20 VA	230 V	12 V	1,667 A	13,96 V

Tab. 2.2: Parametry stávajícího síťového transformátoru

Toroidní transformátor je součástí stávajícího rozvaděče, který bude sloužit k připojení pece do elektrického rozvodu budovy. Vzhledem k tomu, že transformátor napájí obvody, které vyžadují přímou interakci s uživatelem (bude se částí jednotky přímo dotýkat), musí se jednat o tzv. bezpečnostní transformátor. Tento typ transformátoru zajišťuje dostatečnou elektrickou izolaci mezi primárním a sekundárním vinutím. Výstupní napětí transformátoru musí být dostatečné pro spínaný stabilizátor i při poklesu napětí v síti o 10 %. Spínaný stabilizátor N1 vyžaduje na svém vstupu pro udržení konstantního výstupního napětí $U_{OUT} = 5\,V$ vstupní napětí vyšší o $U_{DROP} = 2{,}2\,V$, tedy $U_{IN} = 7{,}2\,V$. Na každé z diod graetzova usměrňovače vzniká při průchodu proudu úbytek U_F od cca 0,3 V do 0,7 V dle typu diody. U tohoto typu usměrňovače se na vedení proudu v jednom okamžiku podílí vždy dvojice diod, maximální úbytek na těchto diodách je tedy $2{\cdot}U_F = 2 \cdot 0,7\,V = 1{,}4\,V$. Minimální výstupní efektivní hodnota napětí transformátoru musí při maximální zátěži být

$$U_0 = \frac{U_{OUT} + U_{DROP} + 2 \cdot U_F}{\sqrt{2} \cdot 0,9} = \frac{5V + 2,2V + 2 \cdot 0,7V}{\sqrt{2} \cdot 0,9} = 6,76V. \qquad (2.1)$$

Výstupní napětí instalovaného transformátoru je 12 V při jmenovitém sekundárním proudu a 13,96 V naprázdno. Jeho hodnota je tedy pro napájení jednotky dostatečná. Toto napětí je sice cca dvakrát vyšší než požadované minimální výstupní napětí, ale vzhledem k dále zařazenému spínanému stabilizátoru s relativně vysokou účinností 85 %, a tím i malými tepelnými ztrátami, je možné toto napětí akceptovat.

Proudově musí být transformátor dimenzován minimálně na součet maximálních proudů jednotlivých podobvodů řídící jednotky tak, jak je uvedeno v Tab. 2.1. Minimální celkový výstupní proud transformátoru je tedy 295 mA. Je třeba volit transformátor, který je schopen dodat dostatečné výstupní napětí i při maximálním odběru proudu. Navíc je vhodné transformátor předimenzovat. Použitý transformátor o výkonu 20 VA, tedy s proudem 1,667 A, tomuto požadavku plně vyhovuje.

2.2.2 Návrh usměrňovače

Usměrňovač je tvořen graetzovým zapojením čtyř diod D10 až D13. Jedná se o diody SS2H9 s maximálním proudem v propustném směru $I_F = 2$ A a závěrným napětím $U_R = 90$ V (viz [1]). Usměrňovací diody jsou v graetzově zapojení v závěrném směru namáhány maximálně dvojnásobkem amplitudy usměrňovaného napětí. Maximální výstupní napětí transformátoru při maximálním možném 10% přepětí v síti je

$$U_{\mathrm{OUTMAX}} = 2\sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot U_0 = 2\sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot 13,96\,V = 43,4\,V. \tag{2.2}$$

Toto napětí je bezpečně pod maximálním závěrným napětím použité diody $U_R = 90$ V.

Maximální proud diodou v propustném směru I_F v zapojení je dle Tab. 2.1 295 mA. I_F použitých diod je tedy dostačující.

2.2.3 Návrh filtračních kondenzátorů

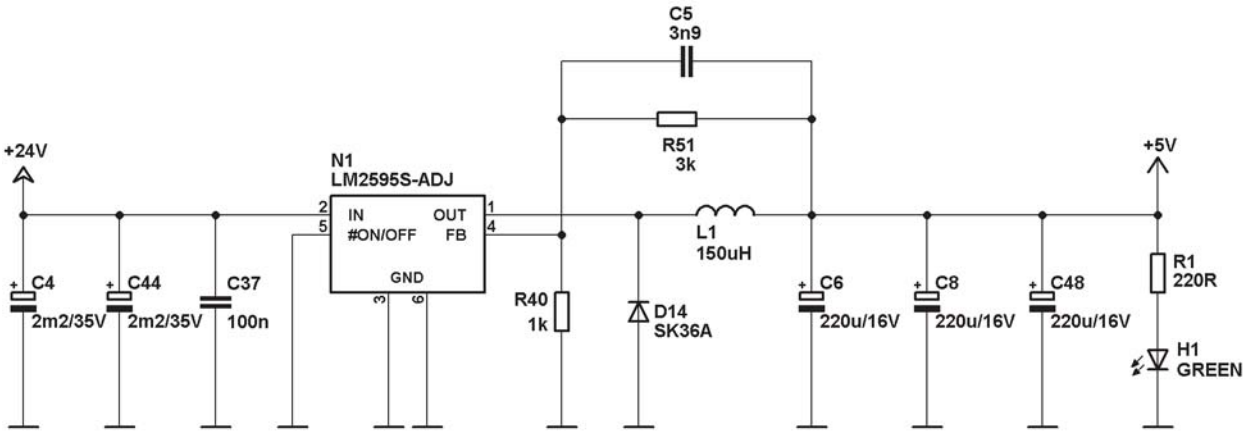
Filtrační kondenzátory C4 a C44 mají za úkol vyfiltrovat dvoucestně usměrněné napětí z graetzova můstku a vytvořit tak napětí stejnosměrné s minimální střídavou složkou (zvlněním výstupního napětí) ΔU. Vzhledem k vysokému potlačení zvlnění napěťového stabilizátoru N1 (cca 60 dB) není nutné dosáhnout na jeho vstupu extrémně nízkého zvlnění. ΔU řádově v nízkých jednotkách V je plně dostačující. Pro výpočet velikosti filtračních kondenzátorů jsem zvolil $\Delta U = 1$ V a maximální proud s rezervou 0,4 A. Vzhledem k vyšší výrobní toleranci hodnoty kapacity elektrolytických kondenzátorů je možné použít zjednodušený vzorec pro výpočet minimální potřebné filtrační kapacity pro dvoucestně usměrněné napětí

$$C_{\mathrm{MIN}} = \frac{I_{\mathrm{MAX}}}{2 \cdot f \cdot \Delta U} = \frac{0,4}{2 \cdot 50 \cdot 1} = 4mF. \tag{2.3}$$

Tento vzorec počítá s vybíjením filtračních kondenzátorů po dobu celé jedné periody usměrňovaného signálu. Ve skutečnosti se filtrační kondenzátory vybíjí o něco kratší dobu, zvlnění tak bude ještě nižší, než požadované. Jako filtrační kondenzátor jsem zvolil paralelně řazenou dvojici kondenzátorů s nízkým ESR a teplotním rozsahem 105 °C (viz [2]), každý s kapacitou 2,2 mF. Celková filtrační kapacita je tedy 4,4 mF.

2.2.4 Návrh stabilizátorů

Spínaný stabilizátor mění hodnotu stejnosměrného napětí na svém vstupu na definovanou velikost (v tomto případě +5 V) a zajišťuje jeho stabilizaci při změnách vstupního napětí anebo změnách výstupního proudu. V zapojení řídící jednotky jsou použity dva napěťové stabilizátory. Spínaný N1 pro vytvoření napájecího napětí +5 V pro všechny části jednotky kromě převodníku N3 a lineární nízkoúbytkový stabilizátor N5, který výstupní napětí obvodu N1 dále sníží na +3,3 V. Toto napětí je potřebné právě pro převodník N3.



Obr. 2.2: Zapojení spínaného stabilizátoru napětí

Na Obr.2.2 je zapojení spínaného stabilizátoru napětí N1 - LM2595S-ADJ. Stabilizátor je v katalogovém zapojení dle [3]. Spínaný stabilizátor má intergrován spínací tranzistor, který v závislosti na velikosti vstupního a výstupního napětí a v závislosti na velikosti výstupního proudu spíná vstupní napětí na výstup stabilizátoru. V době, kdy je tranzistor sepnut, prochází tlumivkou L1 elektrický proud a v tlumivce se akumuluje energie. V době rozepnutí tranzistoru se snaží tlumivka tento protékající proud udržet a akumulovanou energii tak převádí do elektrolytických kondenzátorů

na výstupu stabilizátoru. Průchod proudu obvodem tlumivka - napájený obvod umožňuje po dobu uzavření tranzistoru dioda D14. Pro různé velikosti vstupního a výstupního napětí a výstupního proudu je nutné určit dle [3] parametry diody D14, tlumivky L1 a výstupní filtrační kapacity. Dále je nutné stanovit velikost rezistorů R51 a R40, které nastavují požadovanou velikost výstupního napětí celého stabilizátoru. Výstupní napětí děliče R51, R40 je porovnáváno s vnitřním referenčním napětím stabilizátoru $U_{REF} = 1{,}23\,V$. Pro velikost výstupního napětí platí vztah

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R51}{R40}\right). \tag{2.4}$$

Hodnotu jednoho z rezistorů je nutné zvolit - dle [3] $R40 = 240\,\Omega$ až $1{,}5\,k\Omega$. Zvolil jsem tedy R40 - $1\,k\Omega$. Pro rezistor R51 pak platí

$$R51 = R40 \cdot \left(\frac{U_{OUT}}{U_{REF}} - 1\right) = 1000 \cdot \left(\frac{5}{1,23} - 1\right) = 3065\Omega. \tag{2.5}$$

Nejbližší standardní hodnota rezistoru je $3\,k\Omega$. Přesné výstupní napětí nastavené dvojicí těchto rezistorů tedy bude

$$U_{OUT} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R51}{R40}\right) = 1,23 \cdot \left(1 + \frac{3k\Omega}{1k\Omega}\right) = 4,92\,V. \tag{2.6}$$

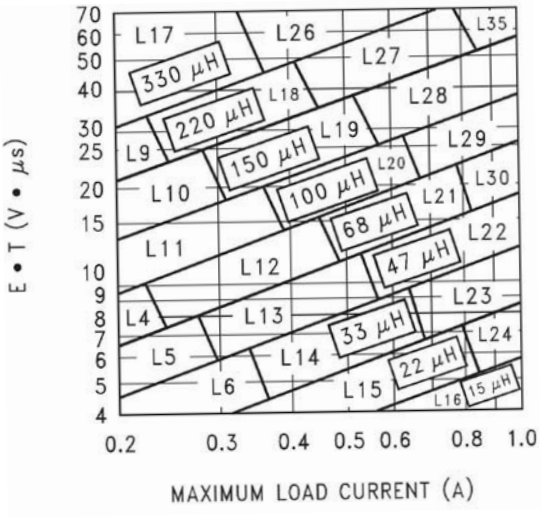
S tímto napájecím napětím jsou schopné bez problémů pracovat všechny použité obvody řídící jednotky.

Dále je pro návrh nutné určit tzv. E·T konstantu tlumivky L1:

$$\begin{aligned} E \cdot T &= (U_{IN} - U_{OUT} - U_{SAT}) \cdot \frac{U_{OUT} + U_D}{U_{IN} - U_{SAT} + U_D} \cdot \frac{1000}{150} = \\ &= (17 - 5 - 1) \cdot \frac{5 + 0,5}{17 - 1 + 0,5} \cdot \frac{1000}{150} = 24,4\,V \cdot \mu s, \end{aligned} \tag{2.7}$$

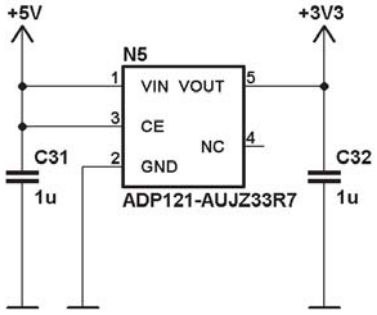
kde U_{IN} je vstupní napětí stabilizátoru, U_{OUT} je výstupní napětí stabilizátoru $+5\,V$, U_{SAT} je saturační napětí spínacího tranzistoru (dle [3] $U_{SAT} = 1\,V$) a U_D je napětí diody D14 v propustném směru, tedy cca $0{,}5\,V$.

Pomocí této E·T konstanty jsem dle Obr. 2.3 zvolil hodnotu indukčnosti tlumivky L1 $150\,\mu H$



Obr. 2.3: Graf pro určení indukčnosti L1 pomocí E·T konstanty, zdroj: [3]

Doporučená hodnota kapacity kondenzátoru na výstupu stabilizátoru je pro výstupní napětí +5 V dle [3] minimálně 220 μF. Je nutné použít typ s nízkým ekvivalentním sériovým odporem ESR. Na výstup stabilizátoru jsem zařadil dvojici paralelně řazených kondenzátorů 220 μF/16 V, typ KZE s velmi nízkým ESR (viz [4]). [3] dále určuje kapacitu kondenzátoru C5, který zvyšuje stabilitu stabilizátoru. Pro výstupní napětí 5 V je doporučena hodnota 3,9 nF.



Obr. 2.4: Zapojení nízkoúbytkového stabilizátoru napětí

Pro napájení převodníku N3 je za spínaný stabilizátor zařazen nízkoúbytkový lineární stabilizátor N5 - ADP121-AUJY33R s pevným výstupním napětím +3,3 V (viz Obr.2.4). Tento stabilizátor dosahuje U_{DROP} pouze 120 mV a maximální výstupní proud obvodu je 150 mA, což pro napájení použitého převodníku postačuje. Potlačení zvlnění vstupního napětí dosahuje 70 dB, což zajišťuje kvalitní napájecí napětí pro analogovou část měřícího převodníku N3. Stabilizátor je zapojen dle katalogového

listu [5]. Obvod pro svoji funkci vyžaduje pouze přivedení napájecího napětí, připojení dvou blokovacích keramických kondenzátorů ke vstupu a výstupu a přivedení vhodné logické úrovně na vstup Chip Enable - CE. Při napětí o velikosti od 0,4 V na tomto vstupu udržuje obvod na svém výstupu požadované napětí.

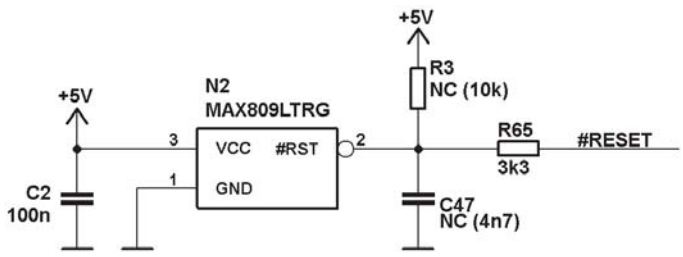
2.3 Řídící část

Celá řídící jednotka je řízena mikrokontrolérem typu AVR - ATmega128 od firmy Atmel. Jedná se o 8bitový mikroprocesor doplněný o další periferie. Tento mikrokontrolér jsem zvolil z důvodu dostatečného počtu vstupně-výstupních pinů, dostatečně velkého paměťového prostoru (grafický displej vyžaduje ukládání rozměrných dat reprezentujících obrazce, např. fonty) a kvůli vyhovující skladbě a počtu periférií (viz [6]). Návrh řídící jednotky pece z těchto periferií využívá:

- sériový kanál UART
- sběrnici TWI (firemní název firmy Atmel pro sběrnici I^2C)
- sběrnici SPI
- JTAG
- 8bitový a 16bitový čítač/časovač

2.3.1 Časování a reset mikrokontroléru

Časování mikrokontroléru zajišťuje krystal B1 o frekvenci 11,0592 MHz. Tuto frekvenci jsem zvolil z důvodu snadného generování přenosových rychlostí sériového kanálu, které jsou běžně podporovány osobními počítači. Pro správnou funkci mikrokontroléru musí být zaručen tzv. reset obvodu. Ten zajistí, že mikrokontrolér začne s vykonáváním obslužného programu na správné adrese v paměti programu. Pro reset mikrokontolérů AVR je nutno na jejich vstup RESET přivést nízkou úroveň logického sinálu. Navíc je v zapojení počítáno i s případným použití běžné kombinace rezistoru R3 a kondenzátoru C47.

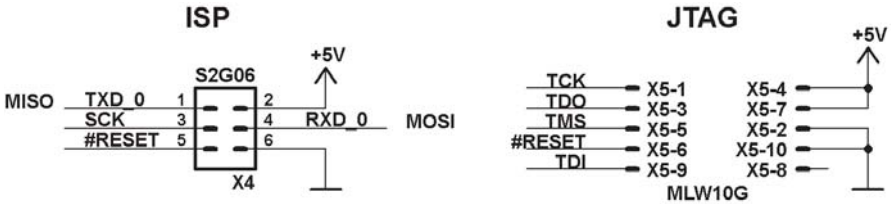


Obr. 2.5: Obvod pro reset mikrokontroléru

Počáteční přesně definovaný reset a ochranu mikrokontroléru v případě nízkého napájecího napětí zajišťuje obvod D1 MAX809LTRG (Obr. 2.5). Tento obvod generuje na svém výstupu nízkou úroveň logického signálu po dobu náběhu napájecího napětí a také v případě, že napájecí napětí klesne pod hranici 4,63 V (typicky, viz [7]). Obvod tak kompletně ošetřuje resetem stavy mikrokontroléru, při kterých není výrobcem zaručena jeho správná funkce. Pro použití tohoto obvodu s mikrokontroléry AVR je dle [8] doporučeno zařadit na výstup tohoto obvodu rezistor R65 o odporu 3,3 kΩ.

2.3.2 Programování paměti mikrokontroléru

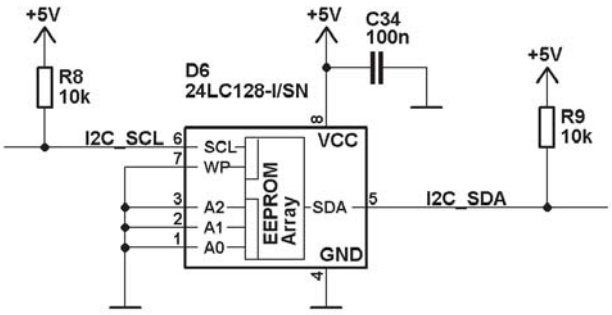
Paměť programu mikrokontroléru je programována přes sběrnici ISP (6pinový konektor X4), případně JTAG (10pinový konektor X5), přes který je možné při vývoji ladit jednotlivé části obslužného programu. Sběrnici ISP tvoří u mikrokontroléru ATmega128 vodiče sériového kanálu 0. Zapojení konektorů obou sběrnic je standardizované (viz Obr. 2.6) tak, aby bylo možné zařízení naprogramovat různými typy programátorů.



Obr. 2.6: Sběrnice pro programování paměti mikrokontroléru

2.3.3 Sériová EEPROM

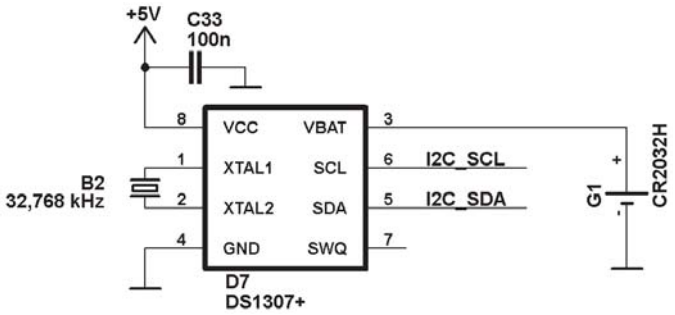
Data (teplotní profily, různá nastavení) ukládá mikrokontrolér pomocí sběrnice I^2C do sériové EEPROM paměti D6 24LC128. Tato paměť má velikost 8096 x 8 bitů. Obvod má na sběrnici I^2C 7bitovou adresu, jejíž nejnižší 3 bity lze nastavit přivedením vhodných logických úrovní na vstupy A0 až A3. Vyšší čtyři bity jsou pevně dány už při výrobě obvodu - 1010. V zapojení řídící jednotky jsou všechny adresové vstupy připojeny na společný zemní vodič. Zapojení paměti je na Obr. 2.7.



Obr. 2.7: Zapojení paměti EEPROM

2.3.4 Obvod reálného času - RTC

Pomocí I²C komunikuje mikrokontrolér také s obvodem reálného času D7 DS1307, který zajišťuje časovou orientaci řídící jednotky pece. RTC je vlastně sériová EEPROM, jejíž paměťové buňky mají význam počtu roků, měsíců, dní, hodin, minut a sekund a obvod dokáže v reálném čase data v těchto paměťových prostorech automaticky měnit. Při správném počátečním nastavení tohoto obvodu (uložení přesného času) umožňuje jednotka zobrazení přesného času, kdy dojde k ukončení vypalovacího procesu. Funkce tohoto obvodu je při výpadku napájecího napětí zálohována baterií G1. Proudový odběr z baterie v době výpadku napájecího napětí obvodu D7 je 300 nA až 500 nA (viz [9]) Zapojení obvodu je na Obr. 2.8

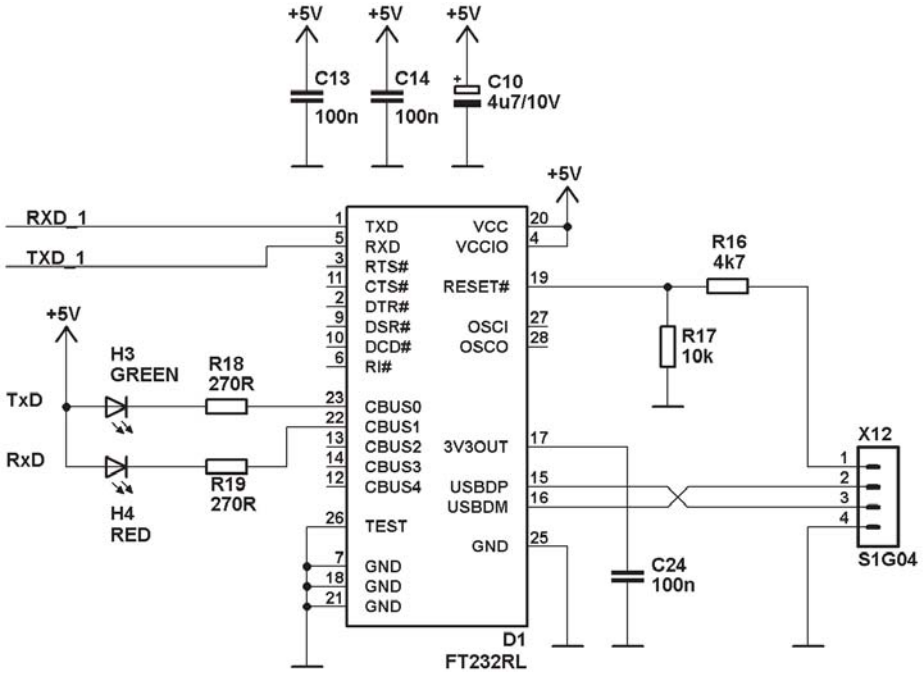


Obr. 2.8: Zapojení obvodu reálného času

2.3.5 USB

Řídící jednotka umožňuje načtení a realizaci tzv. teplotního profilu, tedy udržování v čase proměnné předem nastavené teploty. Informace o teplotním profilu a jeho průběh je možné zadat ručně pomocí ovládací klávesnice. Druhou možností zadání profilu je přenos dat specifickým protokolem z externího zařízení, které je schopné

komunikovat po USB sběrnici. Pro USB komunikaci je řídící jednotka vybavena obvodem D1 FT232RL. Tento obvod převádí komunikaci pomocí UART rozhraní na USB datové pakety, je však schopný pracovat pouze v režimu Device. Tento režim neumožňuje např. připojení USB flashdisků, umožňuje pouze spojení se zařízením typu Host (např. PC). Navíc je na straně zařízení typu Host nutná instalace speciálních ovladačů, které převádí USB komunikaci zpět na komunikaci pomocí virtuálního sériového portu. Vzhledem k plánovanému využití pece pouze k vývojovým účelům je tento typ komunikace dostačující.



Obr. 2.9: Zapojení obvodu pro komunikaci po USB

Na Obr. 2.9 je zapojení obvodu D1 FT232RL (viz [10]). Obvod je na straně USB sběrnice přímo připojen ke vstupnímu USB konektoru, ke své funkci vyžaduje pouze blokovací keramické kondenzátory C13 a C14, které je nutné umístit v těsné blízkosti napájecích přívodů obvodu a napěťový dělič R16, R17, který zajišťuje reset obvodu v případě připojení vnějšího USB kabelu, na kterém je přítomno napájecí napětí USB sběrnice +5 V. Obvod D1 již obsahuje všechny potřebné přepěťové ochrany a impedanční přizpůsobení. V případě připojení zařízení, které není schopno na příslušném vodiči sběrnice USB generovat napájecí napětí +5 V (tedy zařízení typu Device) není komunikace možná. K obvodu jsou dále připojeny dvě LED, které indikují právě probíhající vysílání dat (LED H3), nebo jejich příjem (LED H4). Na straně mikrokontroléru je obvod připojen na vývody sériového kanálu UART1.

2.3.6 PSD regulátor

Úkolem regulátoru je udržovat teplotu uvnitř pece co nejblíže nastavené hodnotě. Vstupem regulátoru je informace o odchylce skutečné hodnoty od požadované - tzv. regulační odchylka $e(t)$. Výstupem je pak hodnota, odpovídající aktuálnímu výkonu, který je třeba topnými tyčemi do regulované soustavy dodávat - tzv. akční veličina $x(t)$. Pro regulaci teploty soustavy se v případě použití spojitého regulátoru hodí jeho PID (proporcionálně-integračně-derivační) varianta. V případě, že je regulátor tvořen číslicově (diskrétně v čase), je označován jako PSD - proporcionálně-sumačně-diferenční regulátor. Akční veličina PID, resp. PSD regulátoru je tvořena součtem tří složek - proporcionální, intergrační a derivační.

P složka regulátoru

Akční veličina P složky regulátoru je tvořena prostým zesílením regulační odchylky, tedy

$$x(t) = r_0 \cdot e(t), \tag{2.8}$$

kde r_0 je tzv. činitel či konstanta zesílení. Nevýhodou samostatného P-regulátoru je teoretická nemožnost dosáhnout nulové regulační odchylky $e(t)$. Jestliže je totiž tato odchylka nulová, je nulová i akční veličina $x(t)$ a tím nutně vzniká nenulová regulační odchylka. Čím vyšší je r_0, tím nižší lze dosáhnout trvalé velikosti regulační odchylky, ovšem v případě příliš vysoké hodnoty r_0 je systém náchylný k rozkmitání - regulátoru se nepodaří regulační odchylku udržet v požadovaných mezích a regulovaná hodnota kmitá kolem hodnoty požadované.

I složka regulátoru

Akční veličina I-regulátoru je určena časovým integrálem regulační odchylky, tedy

$$x(t) = r_\mathrm{i} \cdot \int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t + x(0), \tag{2.9}$$

kde r_i je integrační konstanta. Změna této složky je tedy úměrná velikosti regulační odchylky - čím bude tato odchylka vyšší, tím rychleji bude tato složka regulace růst a naopak. Integrační složka regulátoru je v případě správného nastavení schopna úplně eliminovat regulační odchylku, ovšem rychlost regulace je oproti P-regulátoru nižší. Existuje také riziko rozkmitání regulovaného systému.

D složka regulátoru

Akční veličina derivační složky regulátoru je úměrná rychlosti časové změny regulační odchylky, tedy

$$x(t) = r_{\mathrm{d}} \frac{de(t)}{dt}, \tag{2.10}$$

kde r_{d} je derivační konstanta. Čím rychleji se zvyšuje či naopak snižuje regulační odchylka, tím je hodnota akční veličiny vyšší, resp. nižší.

Kompletní PID regulátor

Velikost akční veličiny PID regulátoru je tvořena součtem jednotlivých složek P, I a D, tedy

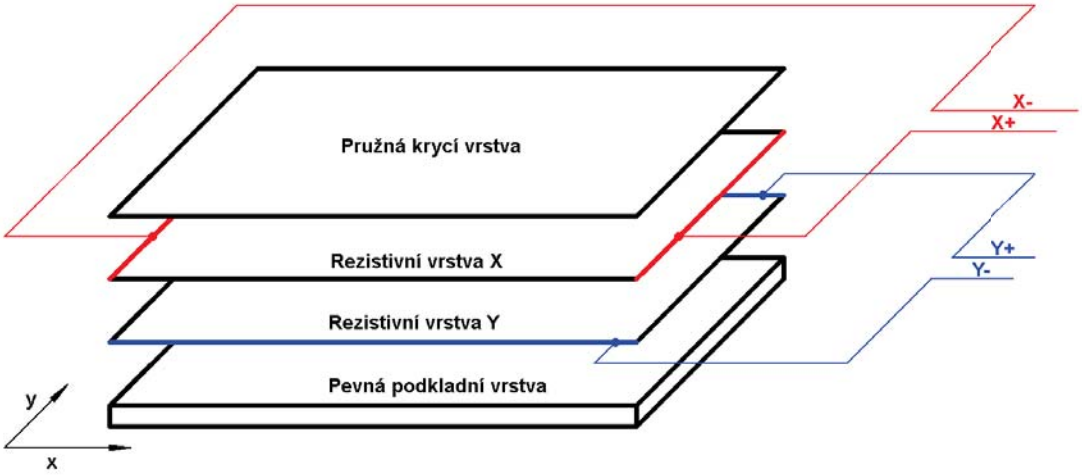
$$x(t) = r_0 \cdot e(t) + r_{\mathrm{i}} \cdot \int_0^t e(t)\,\mathrm{d}t + x(0) + r_{\mathrm{d}} \frac{de(t)}{dt}. \tag{2.11}$$

Pomocí konstanty zesílení r_0, integrační konstanty r_{i} a derivační konstanty r_{d} je možné dosáhnout regulace, jejíž regulační odchylka je nulová, je dostatečně rychlá a přitom stabilní. Existuje několik postupů nastavení PID regulátoru, ovšem všechny jsou založeny především na měření regulované veličiny přímo v regulované soustavě.

2.4 Ovládací, indikační a zobrazovací část

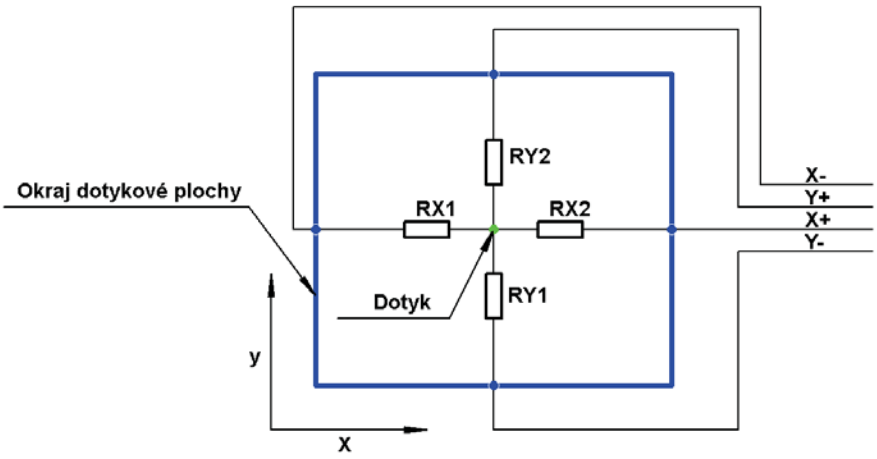
2.4.1 Dotyková plocha

Řídící jednotka je ovládána pomocí průhledné rezistivní dotykové plochy, která je vložena před LCD displej. Plocha je principiálně složena ze čtyř vrstev (viz 2.10). Spodní nosná vrstva je pevná a proti jejímu povrchu je provedeno stlačení vrchních vrstev při dotyku předmětu. Nad touto vrstvou jsou umístěny dvě rezistivní vrstvy, na jejichž protilehlých okrajích jsou vytvořeny elektrody, které umožňují nakontaktování těchto rezistivních vrstev. Elektrody obou rezistivních vrstev jsou umístěny navzájem kolmo a jsou označeny dle směru, ve kterém jsou mechanicky umístěny - X+ a X- resp. Y+ a Y-. Vrchní krycí vrstva je pružná, umožňuje tedy přenos dotyku na rezistivní vrstvy a zároveň je dostatečně odolná, aby tyto citlivé vrstvy ochránila před mechanickým poškozením.



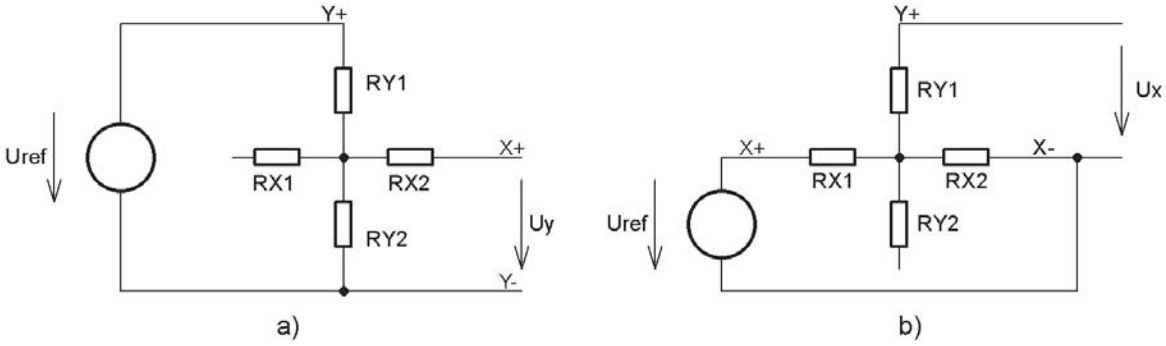
Obr. 2.10: Konstrukce dotykové plochy

Je použito čtyřvodičové zapojení, jehož princip je znázorněn na Obr. 2.11. Při dostatečně silném stlačení dotykové plochy se vytvoří elektrické spojení mezi oběma rezistivními vrstvami a odpor vrstev lze rozdělit na složky RX1 a RX2 ve směru osy x a složky RY1 a RY2 ve směru osy y.



Obr. 2.11: Čtyřvodičové zapojení dotykové plochy

Pokud je na vhodné vývody dotykové plochy připojeno známé napětí U_{ref}, je možné změřit na zbylých nezapojených vývodech napětí, které odpovídá poměru vzdáleností stisku od elektrod rezistivní vrstvy. Pokud je toto měření provedeno pro obě vrstvy zvlášť (viz Obr. 2.12), je možné určit souřadnice místa stisku dotykové plochy ve směru osy x i y.

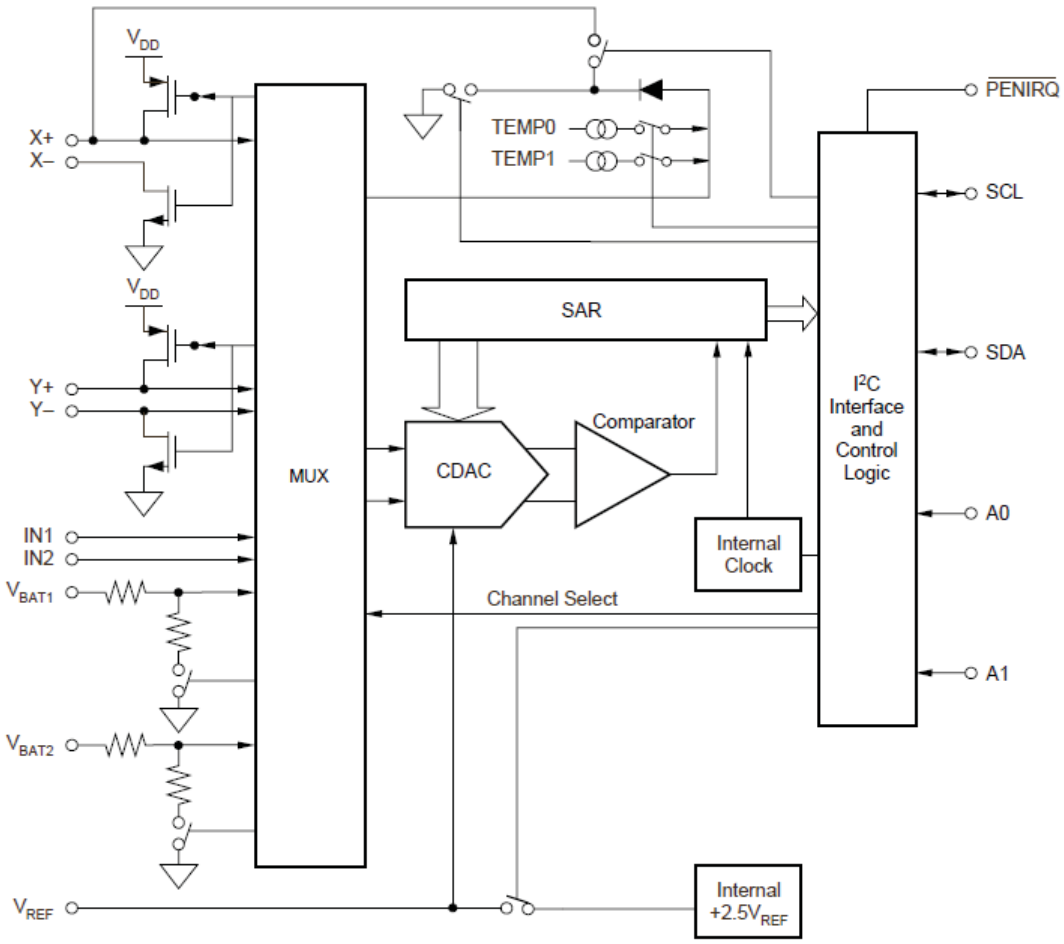


Obr. 2.12: Určení místa stisku dotykové plochy a) ve směru osy y, b) ve směru osy x

Dotykové panely výše uvedené konstrukce se vyrábí v různých velikostech. Použil jsem panel s aktivní plochou o rozměrech 108 mm x 61 mm, což koresponduje s rozměry použitého LCD displeje. Výrobce panelu mi bohužel není znám. Dotykový panel je přilepen kontaktním lepidlem k plechovému rámu LCD displeje a ohebný vývod je prostrčen otvorem pro uchycení rámu k plošnému spoji na druhou stranu spoje (viz Obr. 2.13).

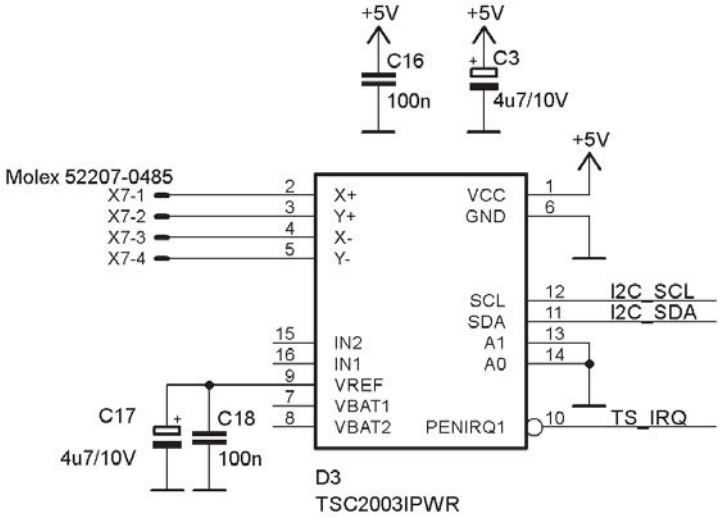
Obr. 2.13: Instalace dotykové plochy na LCD displej

Potřebná měření, jejich vyhodnocení a komunikaci s řídícím mikrokontrolérem zajišťuje obvod D3 TSC2003IPWR. Blokové schéma tohoto obvodu je na Obr. 2.14. Obvod umožňuje kromě práce s dotykovým panelem také měření teploty pouzdra (pomocí vnitřního zdroje proudu, který protéká polovodičovou diodou), měření napětí dvou baterií a dvoukanálové měření dalšího externího napětí. Tyto funkce nejsou v řídící jednotce využity.



Obr. 2.14: Blokové schéma obvodu TSC2003IPWR, převzato z [17]

Řídící část obvodu „Control Logic“ řídí připojování odpovídajících elektrod dotykové plochy k referenčnímu napětí (v zapojení řídící jednotky pece je použito vnitřní referenční napětí „Internal $+2{,}5\,V_{REF}$“), multiplexování měřících vstupů k AD převodníku (blok „MUX“), měření napětí a jeho převod 12bitovým AD převodníkem s postupnou aproximací (bloky „CDAC“, „Comparator“ a „SAR“) a komunikaci pomocí sběrnice I^2C. Obvod umožňuje generování požadavku na přerušení běhu programu při dotyku plochy - nízká úroveň na vývodu PENIRQ, což výrazně usnadňuje obsluhu dotykové plochy.



Obr. 2.15: Zapojení obvodu TSC2003IPWR pro řízení dotykového panelu

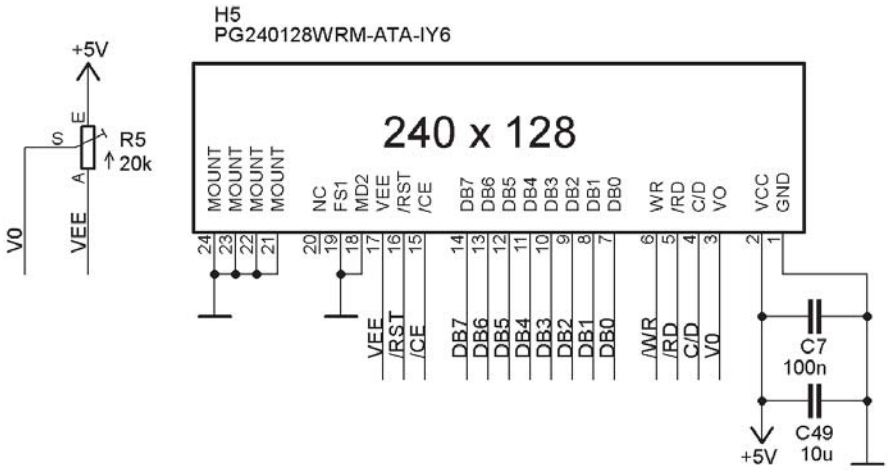
Zapojení obvodu je katalogové, k obvodu stačí připojit napájecí napětí, dotykovou plochu, signály sběrnice I^2C a zabezpečit kvalitní blokování jak napájecího, tak referenčního napětí kombinací tantalového kondenzátoru 4,7 μF/10 V a keramického kondenzátoru 100 nF.

2.4.2 Displej

Všechny hodnoty, které potřebuje obsluha znát a které může měnit, jsou zobrazovány na modrém monochromatickém podsvíceném grafickém displeji PG240128WRM-ATA-IY6 s rozlišením 240 x 128 bodů s řadičem T6963C. Rozměry viditelné plochy displeje jsou 108 mm x 58 mm. Displej je schopen pracovat v plně grafickém, semigrafickém a plně textovém režimu. V grafickém režimu je možné na celé ploše displeje vykreslovat libovolné body. V semigrafickém režimu je možné přes grafiku na displeji vykreslovat text. Výhodou tohoto typu řadiče je přítomnost generátoru fontu. Řadič se tak sám stará o vykreslení textu na danou pozici a mikrokontrolér nemusí text vykreslovat bod po bodu. V plně grafickém režimu displej zobrazuje na celé své ploše pouze textové informace - podobným systémem jako v semigrafickém režimu. Mikrokontrolér s řadičem komunikuje po 8bitové datové sběrnici a dále pomocí řídících signálů, jejichž význam je uveden v Tab. 2.3.

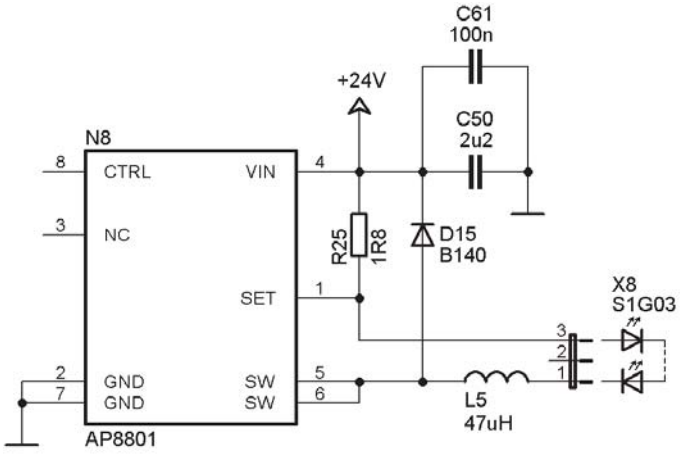
Signál	Význam
D0 až D7	Datová sběrnice displeje
C/D	Log. 0 - přenáší se data, log. 1 - přenáší se instrukce
RD	Čtení dat
WR	Zápis dat, instrukce
CE	Povolení komunikace s displejem
RESET	Reset řadiče
V0	Řízení kontrastu
VEE	Výstup měniče pro řízení kontrastu
MD2	Počet sloupců znaků v textovém režimu
FS1	Velikost fontu v textovém režimu

Tab. 2.3: Řídící signály LCD displeje



Obr. 2.16: Zapojení modulu LCD displeje

Na vstup displeje s označením V0 je nutné přivést záporné napětí, které definuje kontrast LCD displeje. Záporné napětí generuje displej sám a stačí mezi napájecí přívod a pin VEE zapojit trimr s odporem 20 kΩ. Běžec tohoto trimru je pak připojen právě na vstup pro řízení kontrastu V0.



Obr. 2.17: Zdroj pro podsvícení LCD

Podsvícení displeje je řešeno bílými LED diodami, jejichž svit je rozváděn pod celou zobrazovací plochu světlovodným panelem. Doporučený proud LED diodami je $I_F = 120\,\text{mA}$ při napětí v propustném směru $U_{LED} = 3{,}5\,\text{V}$. Proud LED diodami reguluje nastavitelný proudový spínaný zdroj N8 AP8801, jehož výstupní proud lze nastavit vhodnou volbou velikosti odporu rezistoru R25. Dle [11] pro R25 platí

$$R25 = \frac{200\,mV}{I_{\text{LED}}} = \frac{200\,mV}{120\,mA} = 1,67\Omega. \tag{2.12}$$

Vzhledem k tomu, že pec bude provozována ve vnitřních prostorách a nebude třeba dosáhnout maximálního jasu displeje, zvolil jsem nejbližší vyšší hodnotu rezistoru z řady, a to $1{,}8\,\Omega$. Při použití rezistoru této hodnoty bude skutečný proud LED diodami

$$I_{\text{LED}} = \frac{200\,mV}{R25} = \frac{200\,mV}{1,8\Omega} = 111\,mA. \tag{2.13}$$

Blokovací kondenzátory C50 a C61, tlumivka L5 a dioda D15 jsou použity dle katalogového listu obvodu (viz [11]).

2.5 Měřící část

2.5.1 Přehled měřících metod, parametry měření

Pomineme-li např. bezkontaktní měření teploty, existuje několik možných způsobů měření teploty plynného prostředí. Liší se především použitými snímacími členy. Jako měřící článek je možné použít:

- Integrovaný obvod s vnitřním snímačem (rezistivní, křemíkový)

- Rezistivní snímač
- Křemíkový snímač
- Termočlánek

Pro měření teploty uvnitř vypalovací pece je důležitý především teplotní rozsah snímače, jeho vysoká citlivost (velikost změny výstupní veličiny snímače v závislosti na změně teploty) a především jeho mechanické provedení.

2.5.2 Integrovaný obvod s vnitřním snímačem

Na trhu existují integrované obvody, které měří teplotu svého čipu a tu pak převádí na nějakou z forem digitální informace. Výhodou tohoto řešení je jednoduché použití. K obvodu totiž není třeba připojovat žádné externí teplotní snímače. Pro použití při snímání teploty uvnitř vypalovací pece má však toto řešení dvě zásadní nevýhody. První z nich je nutnost umístění integrovaného obvodu přímo do pracovního prostoru. Druhou a zásadnější nevýhodou je teplotní měřící rozsah těchto integrovaných obvodů. Ten bývá přímo závislý na teplotní odolnosti integrovaného obvodu, jehož základ tvoří polovodič. Maximální teploty, které dokáží tyto obvody zpracovat se tak pohybují kolem 125 °C až 150 °C. Pro snímání teploty ve vypalovací peci jsou tedy tyto obvody nepoužitelné.

2.5.3 Rezistivní snímač

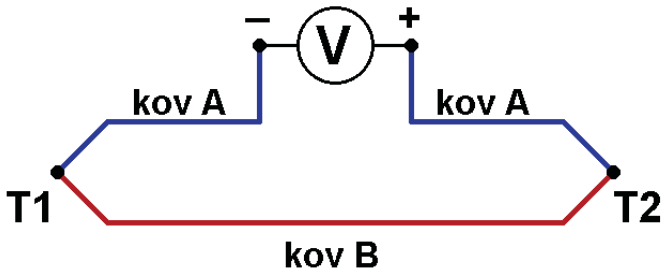
Obecně se tyto snímače označují zkrakou RTD - Resistance Temperature Detector. Tyto snímače jsou nejčastěji tvořeny kovovou vrstvou, která mění svůj elektrický odpor v závislosti na teplotě. Při výrobě těchto součástek se používají především platina (známé především snímače Pt100 a Pt1000), nikl, wolfram či měď. Tyto snímače je možné vyrobit s velmi nízkou výrobní tolerancí a měření teploty je tak velmi přesné. Běžně je možné s RTD snímači dosáhnout přesnosti 0,05 °C. Jejich nevýhodou je však nízká citlivost, řádově desetiny Ω/°C. V silně zarušeném průmyslovém prostředí je použití těchto snímačů velmi obtížné.

2.5.4 Křemíkový snímač

Tyto snímače jsou založeny na teplotní závislosti pohyblivosti nosičů náboje v monokrystalu křemíku. Této závislosti je možné využít např. u snímačů založených na změně Zenerova napětí speciální Zenerovy diody. tyto snímače je možné konstruovat tak, že závislost Zenerova napětí na teplotě je lineární a snímače mají také vysokou citlivost řádově jednotky mV/°C. Jejich nevýhodou, podobně jako u integrovaných snímačů, je však teplotní rozsah, který je pomocí nich měřitelný. Ten bývá dle typu cca -80 °C až +150 °C. Existují sice snímače tohoto typu, které dokáží měřit teploty

až 300 °C, ovšem především jejich mechanické provedení není vhodné pro nasazení v průmyslu.

2.5.5 Termočlánek



Obr. 2.18: Termočlánek

Termočlánek je tvořen dvojím spojením kovových vodičů z různých materiálů A a B (viz Obr. 2.18). Pokud je jeden spoj těchto dvou kovů ohříván na teplotu T2 a druhý udržován na stálé referenční teplotě T1, vzniká na koncích vodičů vlivem Seebeckova jevu termoelektrické napětí. Je možné také využít termočlánek, který je tvořen pouze jedním spojem dvou různých kovů, ovšem je pak třeba zavést tzv. teplotní kompenzaci studeného konce. To je postup, při kterém je buď do měřící části, nebo do výpočtu v případě digitálního zpracování zahrnut vliv teploty na nespojených koncích vodičů termočlánku. Výhodou tohoto řešení je dobrá dostupnost termočlánků, jejich relativně příznivá cena a mnoho variant mechanického provedení termočlánků.

2.5.6 Porovnání snímačů, výběr vhodné varianty

Typ snímače	**Měřící rozsah**	**Citlivost**	**Přesnost**
Integrovaný obvod	-70 °C až +150 °C	Výstup v digitální formě	0,5 °C
Rezistivní snímač	-100 °C až +800 °C	setiny Ω/°C	0,05 °C
Křemíkový snímač	-80 °C až +150 °C	jednotky až desítky mV/°C	1 °C
Termočlánek	-200 °C až +1400 °C	desetiny mV/°C	1 °C

Tab. 2.4: Přehled teplotních snímačů

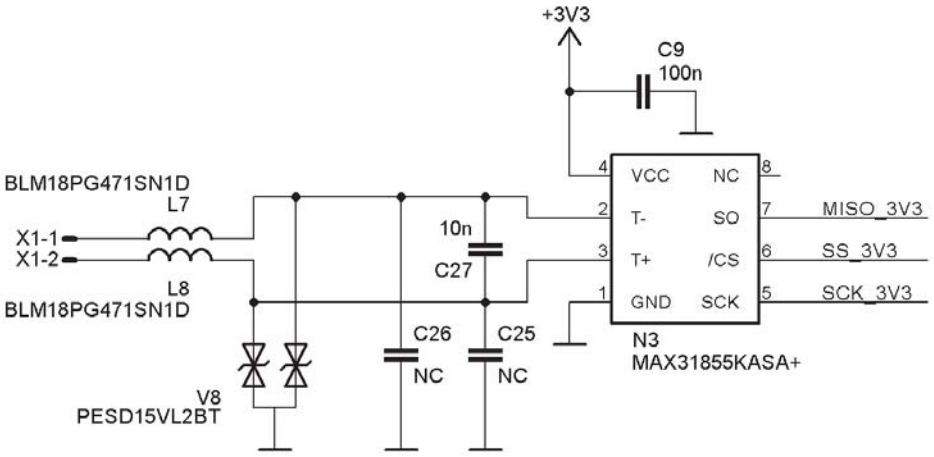
V Tab. 2.4 jsou shrnuty vlastnosti možných řešení snímače teploty pro vypalovací pec. Je zřejmé, že specializované integrované obvody pro měření své vlastní teploty a křemíkové snímače (až na vzácné výjimky) nemají požadovaný teplotní rozsah měření. Rezistivní snímače mají jak požadovaný rozsah měřených teplot, tak dostatečnou citlivost a přesnost. Termočlánky však vynikají množstvím mechanických provedení určených přímo pro průmyslové aplikace. Existují varianty miniaturních termočlánků o rozměrech několika málo milimetrů až po masivní provedení určené do nejnáročnějších mechanických podmínek. Jako vhodný snímač teploty prostředí uvnitř pece jsem zvolil termočlánek typu K, který je tvořen spojením dvou slitin - chromel (90 % nikl a 10 % chrom) a alumel (95 % nikl, 2 % mangan, 2 % hliník a 1 % křemík). Výhodou použitého řešení je především široká škála mechanického provedení termočlánků.

Termočlánky typu K je možné měřit široký rozsah teplot zhruba od -200 °C do 1250 °C. Tento měřící rozsah tedy pro měření teploty uvnitř vypalovací pece postačuje. Výrobce termočlánků udává výstupní napětí termočlánku při různých teplotách a při konstantní teplotě tzv. studeného konce. Tabulka pro použitý termočlánek je umístěna v příloze B (Obr. **??**).

2.5.7 Měřící převodník

Vzhledem k tomu, že k řízení pece je použit mikrokontrolér, je vhodné použít měřící převodník, který převede výstupní napětí termočlánku rovnou na některou z forem digitálního signálu. Použil jsem měřící převodník MAX31855K (viz [12] a [13]), který obsahuje vše potřebné pro takový převod:

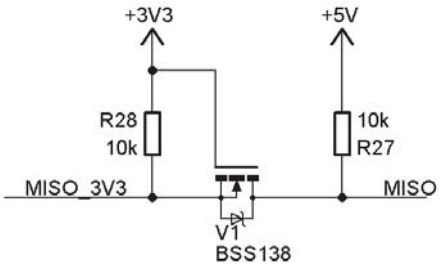
- rozlišení AD převodu 14 bitů, přesnost 0,25 °C
- kompenzace teploty studeného konce termočlánku
- komunikace po sběrnici SPI
- detekce chybně připojeného termočlánku (zkrat na napájecí napětí, rozpojení vodičů termočlánku)



Obr. 2.19: Zapojení měřícího převodníku MAX31855

Na Obr. 2.19 je zapojení měřícího převodníku. K obvodu stačí připojit přes standardizovaný konektor termočlánek, který je v tomto případě tvořený pouze jedním spojem dvou vodičů z různého kovu a obvod na vyžádání provede měření termoelektrického napětí termočlánku, jeho převod do digitální podoby a přenos po SPI sběrnici. Analogovou část obvodu MAX31855K tvoří nízkošumový přesný operační zesilovač. Termoelektrické napětí termočlánku je vhodné před zpracováním filtrovat. Filtrace je zajištěna LC filtrem L7, L8, C27. Tlumivky L7 a L8 tvoří pro vf rušení a šum velkou impedanci a zabraňují tak pronikání rušení do vstupního operačního zesilovače. Kondenzátor C27, zapojený mezi vodiče termočlánku tvoří pro vf signál naopak zkrat. Protože je termočlánek vyveden mimo prostor řídící jednotky, je vhodné na vstup obvodu N3 (resp. ihned za vstupní konektor termočlánku) připojit ochranu před EMI jevy (krátkodobá špičková přepětí, ESD výboje). Tuto ochranu zajišťuje obvod V8 PESD15VL2BT. Tento obvod obsahuje dva bipolární transily, které případné přepětí obou polarit rychle svedou do společného zemnícího vodiče. Napájecí napětí převodníku je 3,3 V a tomu odpovídají i napěťové úrovně signálů SPI sběrnice. Mezi mikrokontrolér a převodník je tedy nutné zařadit převodník úrovní, který zajistí obousměrný převod úrovně 3,3 V na úroveň 5 V a naopak. Převodník úrovní, jehož zapojení je na Obr. 2.20 je nutné zařadit pro každý převáděný signál, v případě SPI sběrnice jsou tedy použity tři shodné převodníky, z nichž každý je tvořen jedním N-MOSFET tranzistorem a dvěma rezistory. Zařízení, které je připojeno na sběrnici SPI má výstup typu otevřený kolektor. Pokud ani jedno ze zařízení na obou stranách negeneruje SPI signál, jsou na obou stranách převodníku napětí odpovídající vysoké logické úrovni. Jestliže zařízení na straně 3,3 V sepne svůj výstupní tranzistor, objeví se mezi gate a source tranzistoru V1 napětí, které tranzistor sepne a přivede tak nízkou logickou úroveň i na stranu 5V zařízení. Jestliže sepne svůj

výstupní tranzistor zařízení na straně 5 V, dojde díky interní diodě tranzistoru V1 i k přenesení nízké úrovně na 3,3V stranu.



Obr. 2.20: Zapojení převodníku napěťových úrovní

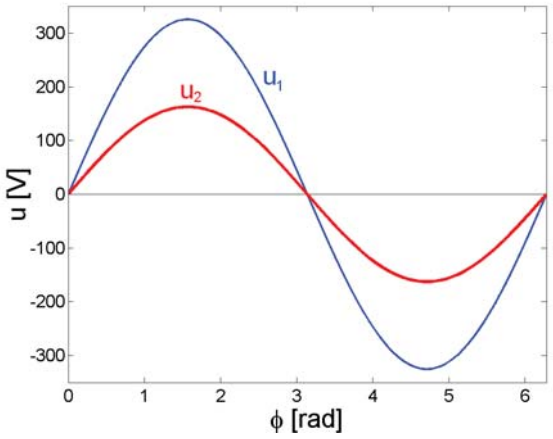
2.6 Výkonová část

Příkon topných těles je regulován v závislosti na rozdílu požadované a skutečné teploty uvnitř pece výstupem PID regulátoru, který je tvořen regulační programovou smyčkou obslužného programu mikrokontroléru. Výstupem PID regulátoru jsou řízeny tři výkonové kanály, každý o příkonu 1 kW. Výkonová část řídící jednotky musí být elektricky izolována od částí jednotky, kterých je možné se při provozu dotýkat. Příkon topných elementů je možné regulovat několika způsoby:

- Změnou amplitudy napájecího napětí
- Sine wave dimming - spínání usměrněného napětí např. IGBT prvkem s frekvenci řádově desítek kHz.
- Propuštěním pouze částí půlvln napájecího napětí (např. fázové řízení)
- Střídavým propuštěním a zadržováním celých půlvln napájecího napětí

2.6.1 Změna amplitudy napájecího napětí

Na Obr. 2.21 je znázorněna jedna perioda vstupního síťového napětí u_1 a napětí na zátěži u_2 v případě, že je výkon dodávaný do zátěže řízen změnou amplitudy napájecího napětí.

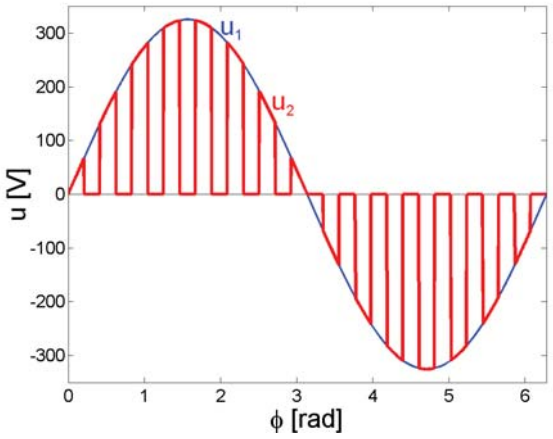


Obr. 2.21: Řízení příkonu pomocí změny amplitudy napětí

Změny amplitudy napájecího napětí je možné dosáhnout např. regulačním autotransformátorem či proměnným rezistorem zařazeným do série se zátěží. Elektrické izolace mezi řídící a řízenou části těchto prvků je dosaženo mechanickým provedením jejich ovládacích částí. Hlavními nevýhodami tohoto řešení je složitost mechanického provedení a malá rychlost regulace v případě regulačního autotransformátoru a nízká účinnost v případě použití rezistivního prvků, zařazeného do série se zátěží - veškerá nadbytečná energie se maří právě v tomto rezistoru. Tyto metody jsou pro řízení výkonu topných tyčí pece nevhodné.

2.6.2 Sine wave dimming

Jedná se o techniku, která je založena na PWM spínání usměrněného napětí (např. IGBT tranzistorem), který ještě před usměrněním projde zátěží. Frekvence spínání je volena v řádech několika desítek kHz. Hlavní výhodou tohoto řešení je linearita regulace a při zařazení čistě odporové zátěže i malé nf rušení, mírnou nevýhodou pak nutnost zařazení budícího obvodu, který zajistí elektrickou izolaci mezi řídící a řízenou stranou a generuje dostatečné napěťové a proudové pulzy pro sepnutí prvku IGBT. Průběhy napájecího napětí u_1 a napětí na zátěži u_2 jsou patrné na Obr. 2.22. Pro názornost je na obrázku frekvence PWM spínání pouze 15 krát vyšší, než je frekvence síťového napětí u_1.

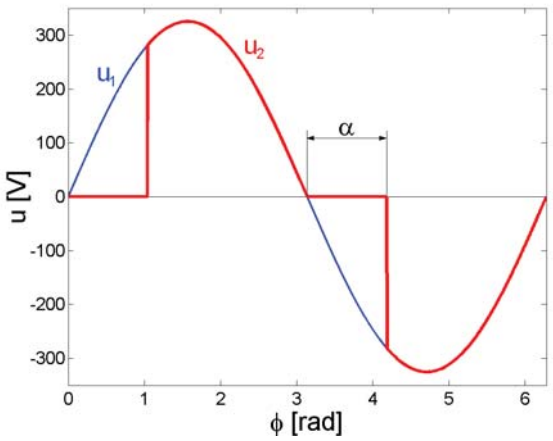


Obr. 2.22: Řízení příkonu pomocí techniky sine wave dimming

Topné tyče pece jsou však tvořeny odporovým vodičem navinutým na keramickém tělese a pro použití v systému, který využívá sine wave dimming jsou díky své indukčnosti (L = 54 μH při frekvenci f = 20 kHz) nevhodné. Vícekanálový sine wave dimming systém navíc neumožňuje propojení jednoho z pracovních vodičů do společného uzlu.

2.6.3 Propuštěním pouze částí půlvln proudu

Tato metoda je založena na propuštění pouze určité části harmonického průběhu napájecího proudu. K sepnutí proudu zátěží dochází v okamžiku, kdy má harmonický průběh napájecího napětí přesně definovanou fázi.

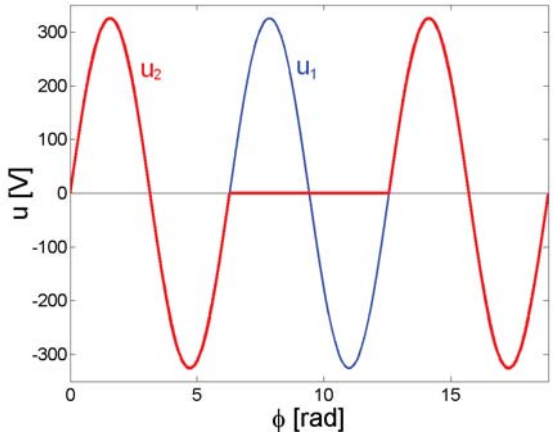


Obr. 2.23: Fázové řízení

Na Obr. 2.23 je jedna perioda napětí na zátěži u_2 v případě fázového řízení s úhlem sepnutí α. Změnou úhlu sepnutí je možné regulovat efektivní hodnotu regulovaného napětí. Jako spínací prvek se v tomto zapojení využívá především triak pro nižší výkony do několika kW nebo tyristor pro výkony od několika kW až po stovky kW. Hlavní výhodou těchto spínacích prvků je jejich přechod do blokujícího stavu při komutaci proudu. Protékající proud je tedy rozepnut ve chvíli, kdy má nulovou hodnotu a na indukčnosti zátěže se tak nevytvoří napětí s opačnou polaritou, které by namáhalo spínací součástku.

2.6.4 Střídavé propuštění a zadržování půlvln proudu

Při tomto systému řízení příkonu topných elementů je proud zátěží sepnut v okamžiku průchodu napájecího napětí nulovou hodnotou a rozepnut v okamžiku, kdy má proud protékající zátěží nulovou hodnotu. Spínací prvek tak propouští či zadržuje určitý počet celých půlvln napájecího proudu.



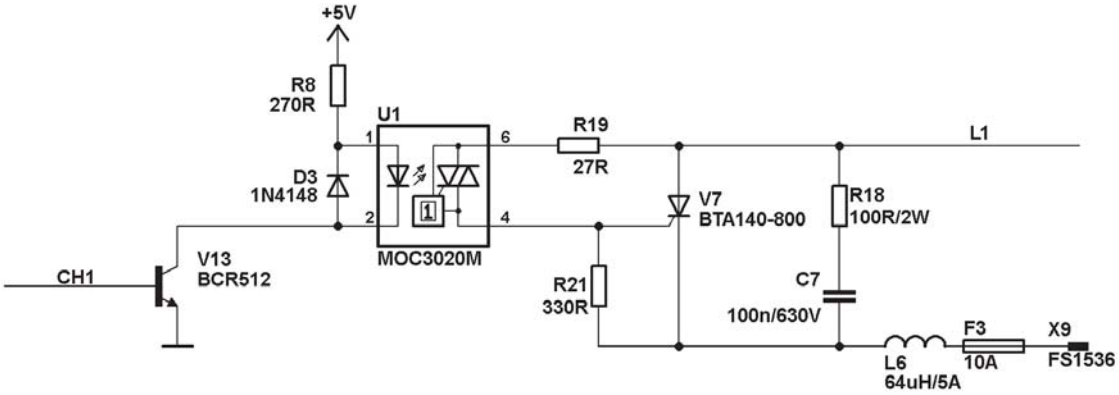
Obr. 2.24: Střídavé propouštění půlvln napájecího proudu

Na Obr. 2.24 jsou znázorněny tři periody napětí na zátěži. V naznačeném případě jsou na zátěž propuštěny dvě vlny napětí, jedna vlna je vynechána. Tento systém řízení výkonu je možné použít pouze k řízení zátěží, u nichž je relativně nízká rychlost odezvy na změnu napájecího proudu, tedy např. k řízení použitých topných tyčí.

2.6.5 Volba řešení

V případě použití induktivní zátěže se metoda sine dimming jeví jako nevhodná především kvůli nesnadnému řešení přechodových dějů v obvodu a s tím spojenými ztrátami při spínání proudu zátěží. Výsledný obvod je pak větší, dražší a má vyšší

tepelné ztráty. Pro řízení výkonu topných tyčí jsem tedy zvolil metodu propuštění části nebo celých půlvln napájecího proudu. Obě tyto metody je možné realizovat stejným obvodovým zapojením optotriaku a triaku. Vpřípadě propouštění celých půlvln napájecího proudu lze s výhodou využít optotriak s tzv. spínáním v nule. Tato součástka má již integrován detektor, který v případě požadavku na sepnutí zajistí toto sepnutí až v okamžiku, kdy je hodnota napájecího napětí nulová. V případě využití fázového řízení je nutné použít optotriak bez tohoto detektoru, tedy součástku, která je schopná sepnout proud zátěží v různém okamžiku po průchodu napájecího napětí nulovou hodnotou.

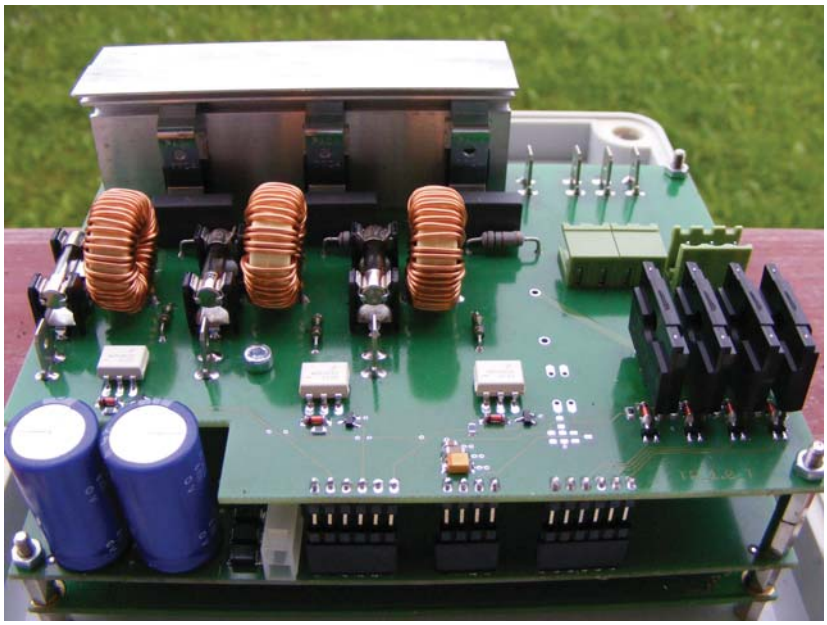


Obr. 2.25: Jeden kanál výkonové části řídící jednotky

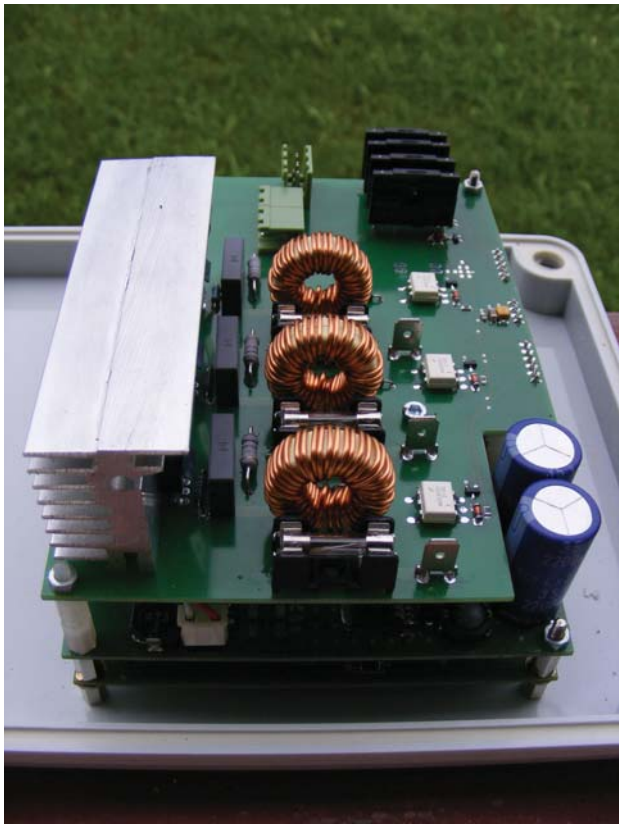
Na Obr.2.25 je zapojení jednoho ze tří výkonových kanálů jednotky. Kanál je řízen vývodem z procesoru, který pomocí tranzistoru V13 ovládá optotriak U1 MOC3020. Jedná se o optotriak, který spíná zátež v nule napětí. Je zapojen podle katalogového listu [16] a [19]. Přesné hodnoty prvků R18, C7 a L6 jsem zkusmo zvolil podle velikosti přechodových jevů ve výsledném obvodu. Vzhledem k zmíněnému spínání v nule není řešení těchto přechodových jevů tak složité, jako při spínání v obecném okamžiku průběhu napájecího napětí (fázové řízení).

2.7 Mechanické provedení řídící jednotky

Jednotka je tvořena dvěma deskami plošných spojů, jejichž nákresy jsou v přílohách A až D. Sestavený komplet (viz Obr.2.26 a br.2.27) Jednotka je umístěna ve standardizované instalační krabici s krytím IP55, která je tedy sama o sobě dostatečně odolná především proti prachu. Bylo nutné vyříznout otvor pro viditelnou část LCD displeje a dotykovou plochu. Jednotka je k peci připevněna pomocí dvou spojovacích můstků, které zároveň slouží pro vedení nutné kabeláže.



Obr. 2.26: Komplet desek plošných spojů



Obr. 2.27: Komplet desek plošných spojů

Mechanické provedení celé pece je co se týká přestupu tepla do okolí velmi dobré. Dodatečnou montáží odrazivých panelů na povrch pece bylo dosaženo oteplení povrchu pece o zhruba 30 °C nad teplotu okolí při čtyřhodinovém provozu pece na maximální teplotě 250 °C. Povrchová teplota držáku jednotky v místě styku s jednotkou pak byla pouze o cca 20 °C vyšší než teplota okolí. Většina kabeláže je umístěna mezi odrazivými plochami a keramickým obkladem pece. Kabeláž je vedena v bužírkách ze skelného vlákna s teplotní odolností 1200 °C. Řešení pece jako skeletu z ocelových profilů se však ukázalo jako špatné řešení. Během provozu (především při teplotách nad 200 °C se konstrukce v některých místech prohnula a objevily se i praskliny keramického obložení pece. Nejvíce se ohnutí profilů projevilo na dvěřích pece - původně použitý profil z magnetické gumy, který udržoval dvěře zavřené, přestal plnit svoji funkci a při měření musela být pec uzavírána mechanickou truhlářskou svorkou. Navíc obložení dvěří pece z žáruvzdorné pěny (použita kvůli hmotnosti) se při prohýbání mechanicky drolilo. Měření uvnitř pece tím nebylo ovlivněno, ale pec ve stávající podobě není použitelná ke svému účelu. Proto je v současnosti vyvíjena nová konstrukce vypalovací pece.

3 PROGRAM

3.1 Jazyk, vývojové prostředí

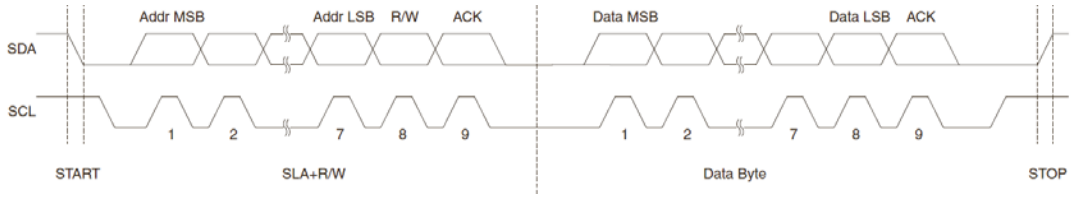
Mikrokontrolér vykonává obslužný program, který je napsaný v jazyce C ve vývojovém prostředí Atmel Studio 6.0. Toto vývojové prostředí obsahuje vše potřebné pro vývoj aplikací s procesory Atmel AVR - editor, compiler, linker, debuger a prostředí pro fyzické nahrání programu do paměti mikrokontroléru.

3.2 Obsluha LCD displeje

Knihovny pro obsluhu LCD displeje jsem s mírnými úpravami převzal z [20]. Dále jsem využil nadstavbu těchto knihoven, uvedenou na [21]. Tyto knihovny jsou organizovány do vrstev - od fyzické, která definuje ovládací signály přes vrstvu LCD displeje, která zprostředkuje přímý přístup do adresního prostoru LCD displeje až po vrstvu grafickou, která umožňuje vykreslovat na displeji různé grafické obrazce. Z [21] jsem využil knihovnu zajišťující vykreslování specifických ovládacích prvků (tlačítko, progress bar). Jedinou úpravou těchto knihoven byla odlišná inicializace displeje s vyšším rozlišením 240 x 128. Dále jsem knihovny doplnil o vykreslování kombinovaných kontrolních prvků (např. klávesnice).

3.3 Obsluha sběrnice I^2C

Sběrnice I^2C propojuje jedno zařízení typu Master s jedním nebo několika zařízeními typu Slave. Sběrnice umožňuje propojení obvodů pomocí dvou vodičů - SDA - datový vodič - a SCL - hodinový signál. Hodinový signál generuje vždy zařízení Master, data může vysílat jak Master, tak Slave, ale Slave vždy pouze na vyžádání Mastera. Struktura provozu na sběrnici je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Provoz na sběrnici I^2C

Master nejprve vygeneruje start stav, poté adresuje příslušný Slave, se kterým chce komunikovat a v případě, že Slave rozpozná svoji adresu, potvrdí připravenost

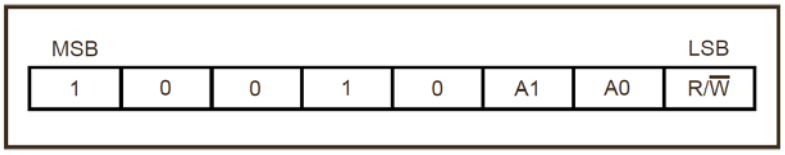
generováním signálu ACK. Dále následuje většinou přenos dat a to různým směrem, v závislosti na nastavení bitu R/W v adresním slovu. mikrokontrolér ATmega128 má tuto sběrnici implementovánu na čipu, její název je z důvodu licenčních podmínek TWI - Two-Wire Serial Interface. Pro ovládání této periferie slouží speciální registry:

- TWBR (TWO WIRE BAUD RATE) - slouží pro nastavení přenosové rychlosti
- TWCR (TWO WIRE CONTROL REGISTER) - řídící registr sběrnice TWI
- TWSR (TWO WIRE STATUS REGISTER) - stavový registr TWI
- TWAR (TWO WIRE ADRESS REGISTER) - adresa mikrokontroléru, pokud by byl provozován jako Slave
- TWDR - datový registr sběrnice TWI

Knihovna twi-lib.c ovládající sběrnici I^2C je volně dostupná na [23]. Pro komunikaci s jednotlivými obvody Slave je nutné nadefinovat pouze jejich I^2C adresy.

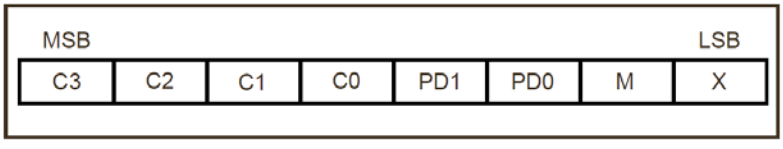
3.4 Obsluha dotykového panelu

Informace o stisku dotykového panelu je zpracována obvodem N6. Je to vlastně 12 bitový AD převodník, který výsledek převodu vyšle po sběrnici I^2C. Adresní byte obvodu na sběrnici je



Obr. 3.2: Adresa obvodu TSC2003 na I^2C

Bity A1 a A0 jsou uživatelsky definované hardwarovým zapojením. Obvod je možné konfigurovat pro práci s plným rozlišením 12 bitů, nebo pro nižší rozlišení 8 bitů. Vzhledem k tomu, že šířka displeje (tedy jeho větší rozměr) je 24 bodů, je 8bitové rozlišení (256 hodnot) plně postačující. Obvod je možné konfigurovat řídícím slovem „Command Byte“:

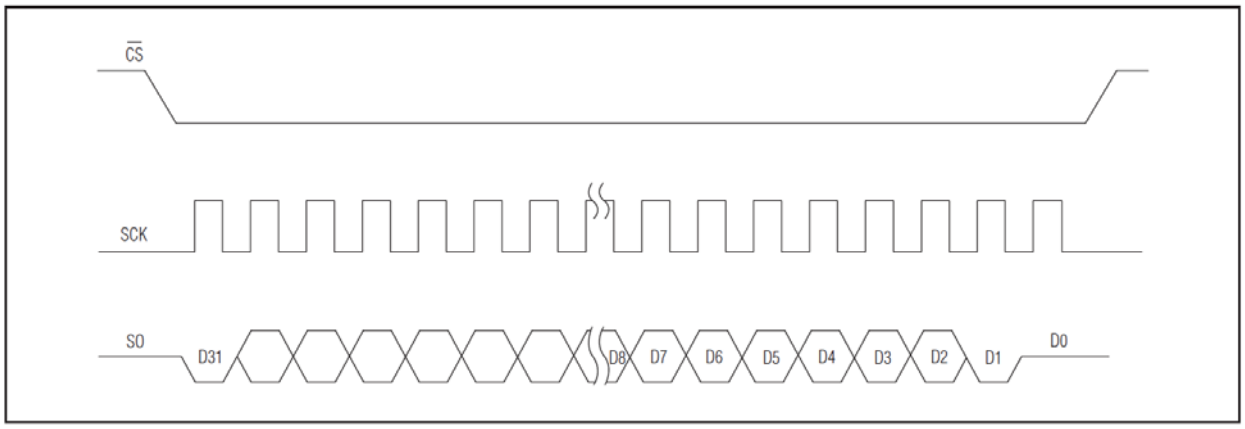


Obr. 3.3: Řídící slovo obvodu TSC2003

kde bity C3 až C0 definují, který ze vstupů interního multiplexeru obvodu bude přiveden na AD převodník. Pro měření napětí odpovídající poloze stisku je hodnota bitů C3 až C0 1100 pro osu X a 1101 pro osu Y. Bity PD1 a PD0 definují, zda je pro měření použit interní nebo externí zdroj referenčního napětí a zda je při stisku generován signál přerušení PENIRQ. V programu jsou nastaveny bity PD1 a PD0 na hodnotu 10, tzn. použití interního referenčního napětí a generování přerušení. Bit M určuje, zda bude obvod pracovat ve 12bitovém režimu (M = 0), nebo 8bitovém režimu (M = 1).

3.5 Obsluha měřícího převodníku

Měřící převodník MAX31855 komunikuje s mikrokontrolérem pomocí sběrnice SPI. Tato sběrnice je třívodičová a zjednodušený časový diagram přenosu dat je na Obr. 3.4. Bity D18 až D31 vyjadřují přímo měřenou teplotu vynásobenou čtyřmi (rozlišení obvodu je 0,25 °C). Další využívané bity jsou D0 až D2. Tyto bity jsou nastaveny na hodnotu 1 pokud není připojení termočlánku v pořádku (zkrat, rozpojení)



Obr. 3.4: Průběh signálu na sběrnici SPI

3.6 PSD regulátor

Využil jsem přímo knihovny pid.h a pid.c, které distribuuje výrobce mikrokontroléru - firma Atmel. Jejich použití je snadné, stačí zadat pouze tři konstanty a poslední měřené hodnoty a algoritmus vypočte velikost akční veličiny možný rozsah 0 - 1. To odpovídá v případě řídící jednotky nulovému a plnému výkonu topných tyčí. Měření bylo zahájeno s řízením výkonu pomocí metody fázového řízení. Je možné přesně nastavit požadovaný výkon, ovšem za cenu vyššího rušení do sítě. Postupně

byl systém řízení zjednodušován na maximální možnou úroveň. Tepelná setrvačnost pece je tak velká (samotná pec váží cca 80 kg a vložené transformátory mohou míta až 120 kg), že k dosažení kolísání teploty o maximálně dva stupně je možné vypustit fázové řízení a připojovat jen jednotlivé tyče s plným výkonem. Výkon je tedy možné regulovat v krocích o velikostí 33%. To velmi výrazně zjednodušuje řízení pece.

4 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout koncepci, schéma zapojení a mechanickou konstrukci řídící jednotky vypalovací pece pro výrobu transformátorů, realizovat ji a ověřit její vlastnosti. Tato pec bude sloužit při vývoji prototypů a výrobě malých sérií vinutých dílů pro svařovací techniku. Návrh schématu jednotky postihuje všechny požadované parametry zadání. Jednotku je možné napájet ze specifikovaného síťového přívodu. Jednotka obsahuje obvody, které umožňují měření teploty uvnitř vypalovací pece běžně dostupným termočlánkem typu K a především její automatickou regulaci bez zásahu obsluhy. Teplotu uvnitř pece a ostatní důležité informace o výrobním procesu je možné zobrazit na grafickém podsvíceném LCD displeji. Jednotku je možné ovládat ručně pomocí dotykového panelu. Jednotka umožňuje komunikaci se zařízením, připojeným pomocí USB sběrnice (např. PC). Pomocí tohoto zařízení je možné do jednotky přenášet informace o požadovaných teplotních profilech procesu a přenos měřených hodnot teploty uvnitř pece zpět do připojeného zařízení k pozdějšímu vyhodnocení. Pozornost při návrhu obvodových zapojení jednotlivých částí jednotky byla kladena především na budoucí možnost použití doplňkového řešení při filtraci analogového signálu z termočlánku. Na vstup měřícího převodníku je tak v případě potřeby možné připojit doplňkový LC filtr. Napájení všech integrovaných obvodů je blokováno lokálně umístěnými keramickými kondenzátory. U součástek citlivých na kvalitu napájecího napětí (např. mikrokontrolér) je tato blokovací kapacita složena z několika kondenzátorů odstupňovaných podle hodnoty jejich kapacity.

Vzhledem k mechanickému poškození pece nebylo možné provést všechna měření, výsledky však ukazují, že řízení vnitřní teploty podobně velkých systému není příliš kritické. K řízení výkonu postačuje pouhé připínání jednotlivých topných tyčí, tedy změna použitého výkonu o 33%. I s takto hrubou změnou je možné dosáhnout dostačující přesnosti +-2 °C.

LITERATURA

[1] VISHAY *High-Voltage Surface Mount Schottky Rectifier* [online]. 2006, [cit. 6. 2. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.farnell.com/datasheets/64532.pdf>.

[2] NIPPON CHEMI-CON *Miniature Aluminium Electrolytic Capacitors - KZE Series* [online]. 2010, [cit. 6. 2. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/al-e/al-sepa-e/004-lead/al-lxz-e-120701.pdf>.

[3] TEXAS INSTRUMENTS *LM2595 SIMPLE SWITCHER^{TM} Power Converter 150 kHz 1A Step-Down Voltage Regulator* [online]. 2004, [cit. 28. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2595.pdf>.

[4] NIPPON CHEMI-CON *Miniature Aluminium Electrolytic Capacitors - KZE Series* [online]. 2010, [cit. 28. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/pdf/al-e/al-sepa-e/004-lead/al-kze-e-120701.pdf>.

[5] ANALOG DEVICES *150 mA, Low Quiescent Current, CMOS Linear Regulator* [online]. 2011, [cit. 6. 2. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.farnell.com/datasheets/1511563.pdf>.

[6] ATMEL CORPORATION *ATmega128 - 8-bit Atmel Microcontroller with 128KBytes In-System Programmable Flash* [online]. 2011, [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf>.

[7] MAXIM INTEGRATED *MAX803/MAX809/MAX810 - 3-Pin Microprocessor Reset Circuits* [online]. 2010, [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX803-MAX810Z.pdf>.

[8] ATMEL CORPORATION *Application note AVR180: External Brown-out Protection* [online]. 2002, [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/Images/doc1051.pdf>.

[9] MAXIM INTEGRATED *DS1307 - 64 x 8, Serial, I²C Real-Time Clock* [online]. 2010, [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf>.

[10] FTDI *Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC* [online]. 2012, [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf>.

[11] DIODES INCORPORATED *AP8801 - 500mA LED Step-down Converter* [online]. 2012, [cit. 7. 3. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.diodes.com/datasheets/AP8801.pdf>.

[12] MAXIM INTEGRATED *MAX31855 - Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter* [online]. 2012, [cit. 1. 12. 2012]. Dostupné z URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>.

[13] MAXIM INTEGRATED *MAX31855 Evaluation Kit* [online]. 2011, [cit. 1. 12. 2012]. Dostupné z URL: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855EVKIT.pdf>.

[14] OMEGA ENGINEERING *Úvod do termočlánků* [online]. [cit. 30. 11. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>.

[15] NXP *PESDxL2BT Product data sheet* [online]. [cit. 3. 2. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.nxp.com/documents/data_sheet/PESDXL2BT_SER.pdf>.

[16] FAIRCHILD SEMICONDUCTOR *MOC3020M - 6-pin DIP Random-phase Optoisolators Triac Driver Output* [online]. 2005, [cit. 1. 12. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.farnell.com/datasheets/94947.pdf>.

[17] TEXAS INSTRUMENTS *I2C Touch Screen Controller* [online]. 2005, [cit. 15. 4. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tsc2003.pdf>.

[18] TEXAS INSTRUMENTS *Using resistive touch screens for human/machine interface* [online]. 2005, [cit. 15. 4. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.ti.com/lit/an/slyt209a/slyt209a.pdf>.

[19] NXP *BTA140 series Triacs* [online]. 2003, [cit. 1. 12. 2012]. Dostupné z URL: <http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BTA140_SERIES.pdf>.

[20] SKOPAL, M. *Knihovna grafických prvků pro mikrokontrolery Atmel AVR a grafické displeje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 47 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zbyněk Fedra, Ph.D. Dostupné z URL: <https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=14617>.

[21] DRBOHLAV, L., FRACER, P. *Doplnění knihovny pro grafický displej* [online]. 2011, [cit. 3. 4. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/MIA/2011/Drbohlav/index.html>.

[22] WIKIPEDIE: Otevřená encyklopedie *I2C* [online]. c2013, [cit. 4. 5. 2013]. Dostupné z URL: <http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=I%C2%B2C&oldid=9902359>.

[23] FLEURY, P. *I2C* [online]. 2013, [cit. 2. 4. 2013]. Dostupné z URL: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html#libs>.

[24] ATMEL *AVR221: Discrete PID controller* [online]. 2006, [cit. 9. 4. 2013]. Dostupné z URL: <http://www.atmel.com/Images/doc2558.pdf>.

http://www.atmel.com/Images/doc2558.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

A Schéma zapojení jednotky **53**

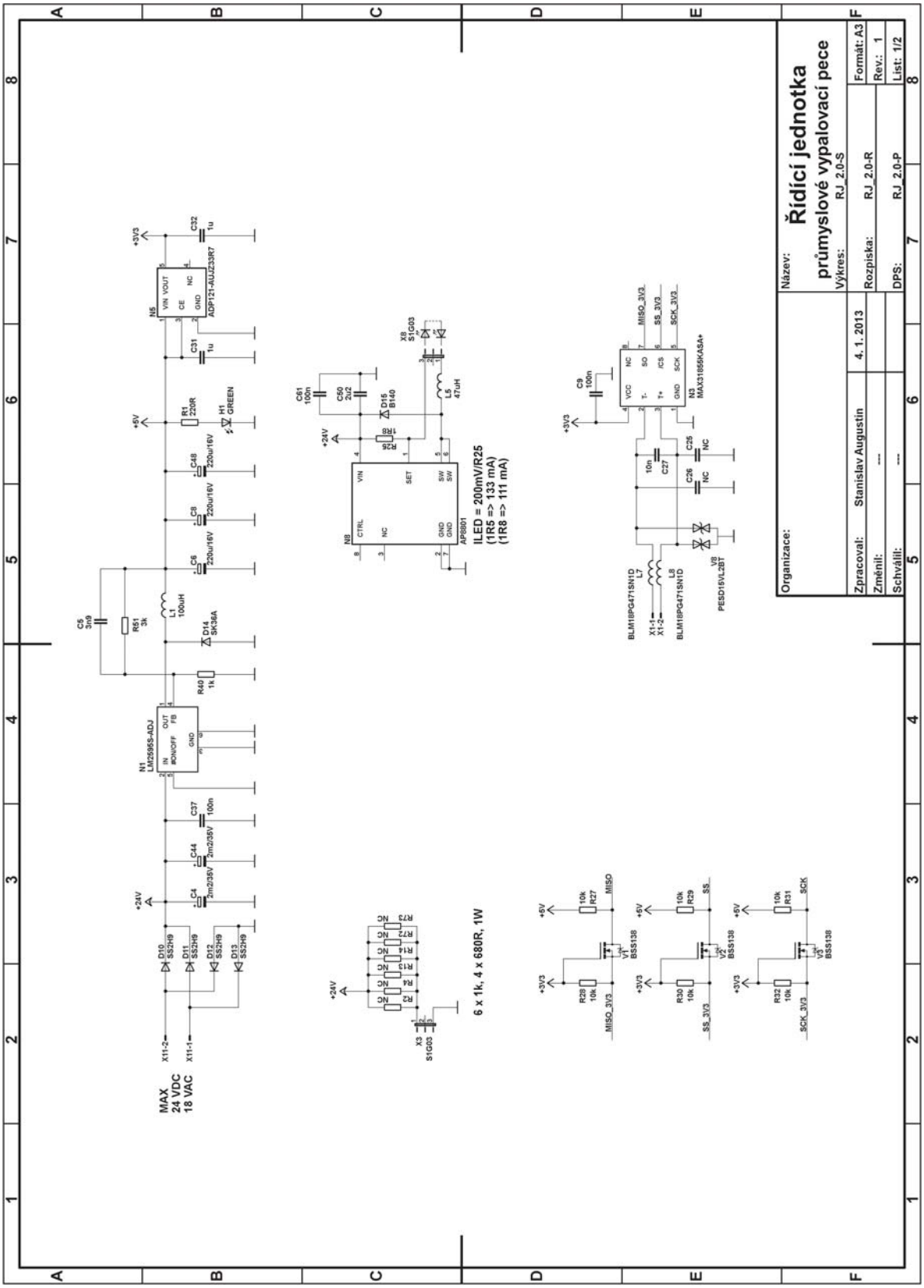
B Rozpisky součástek **57**

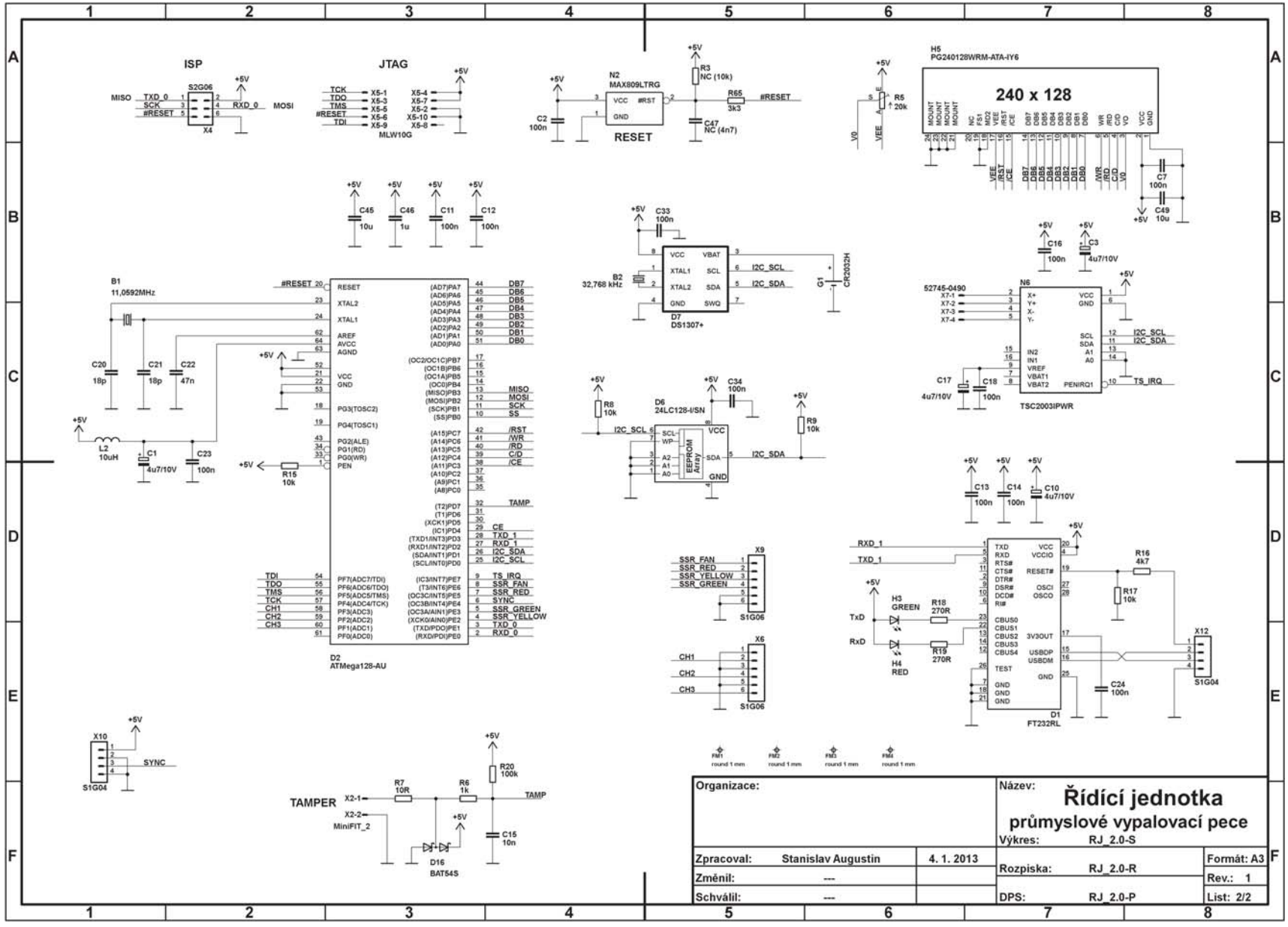
C Osazovací výkresy **60**

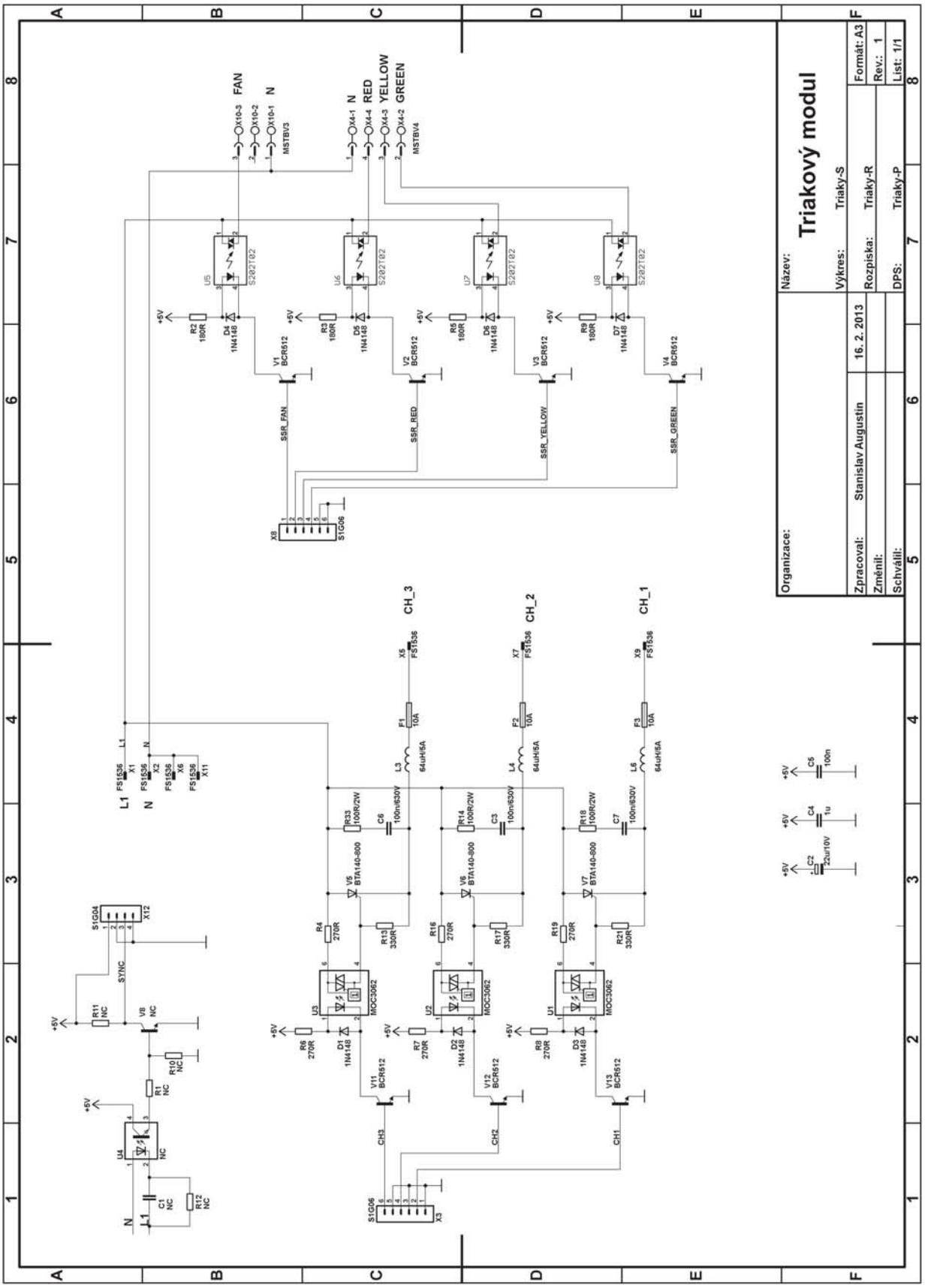
D Motivy DPS **62**

E Podoba vypalovací pece **66**

A SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOTKY




ISP
JTAG
MLW10G
RESET
240 x 128
TSC2003IPWR
DS1307+
CR2032H
24LC128-I/SN
ATMega128-AU
FT232RL
S1G06
S1G04
BAT54S
Organizace:
Název:
Řídící jednotka
průmyslové vypalovací pece
Výkres: RJ_2.0-S
Zpracoval: Stanislav Augustin
4. 1. 2013
Změnil: ---
Schválil: ---
Rozpiska: RJ_2.0-R
DPS: RJ_2.0-P
Formát: A3
Rev.: 1
List: 2/2


Triakový modul
Organizace:
Zpracoval: Stanislav Augustin
16. 2. 2013
Změnil:
Schválil:
Název:
Výkres: Triaky-S
Rozpiska: Triaky-R
DPS: Triaky-P
Formát: A3
Rev.: 1
List: 1/1
FAN
N
RED
YELLOW
GREEN
MSTBV3
MSTBV4
SSR_FAN
SSR_RED
SSR_YELLOW
SSR_GREEN
CH_3
CH_2
CH_1
SYNC
MOC3062
BCR512
BTA140-800
1N4148
S202T02
S1G06
S1G04
S1G06

B ROZPISKY SOUČÁSTEK

Reference	Hodnota	Popis	Pouzdro	Ks
G1	CR2032H	Baterie	CR2032H	1
D15	B140	Dioda SMD	DO214AC	1
D16	BAT54S	Dioda SMD	SOT23	1
D14	SK36A	Dioda SMD	DO214AC	1
D10, D11, D12, D13	SS2H9	Dioda SMD	SMB	4
C6, C8, C48	220u/16V	Elektrolyt. kond.	E2.5-6.3	3
C4, C44	2m2/35V	Elektrolyt. kond.	E7.5-16	2
D6	24LC128-I/SN	Integrovaný obvod	SO-08	1
N5	ADP121-AUJZ33R7	Integrovaný obvod	SOT25	1
N8	AP8801	Integrovaný obvod	SO08	1
D2	ATMega128-AU	Integrovaný obvod	TQFP64	1
D7	DS1307Z+	Integrovaný obvod	SO08	1
D1	FT232RL	Integrovaný obvod	SSOP28	1
N1	LM2595S-ADJ	Integrovaný obvod	TO263-5	1
N3	MAX31855KASA+	Integrovaný obvod	SO08	1
N2	MAX809LTRG	Integrovaný obvod	SOT23	1
D3	TSC2003IPWR	Integrovaný obvod	TSSOP16	1
C2, C7, C9, C11, C12, C13, C14, C16, C18, C23, C24, C33, C34, C37, C61	100n	Kondenzátor SMD	0805	15
C15, C27	10n	Kondenzátor SMD	0805	2
C45, C49	10u	Kondenzátor SMD	1206	2
C20, C21	18p	Kondenzátor SMD	0805	2
C31, C32, C46	1u	Kondenzátor SMD	0805	3
C50	2u2	Kondenzátor SMD	1206	1
C5	3n9	Kondenzátor SMD	0805	1
C22	47n	Kondenzátor SMD	0805	1
C1, C3, C10, C17	4u7/10V	Kondenzátor SMD	SMC_A	4
X7	52207-0485	Konektor	52207-0485	1

Tab. B.1: Rozpiska součástek DPS RJ-2.0

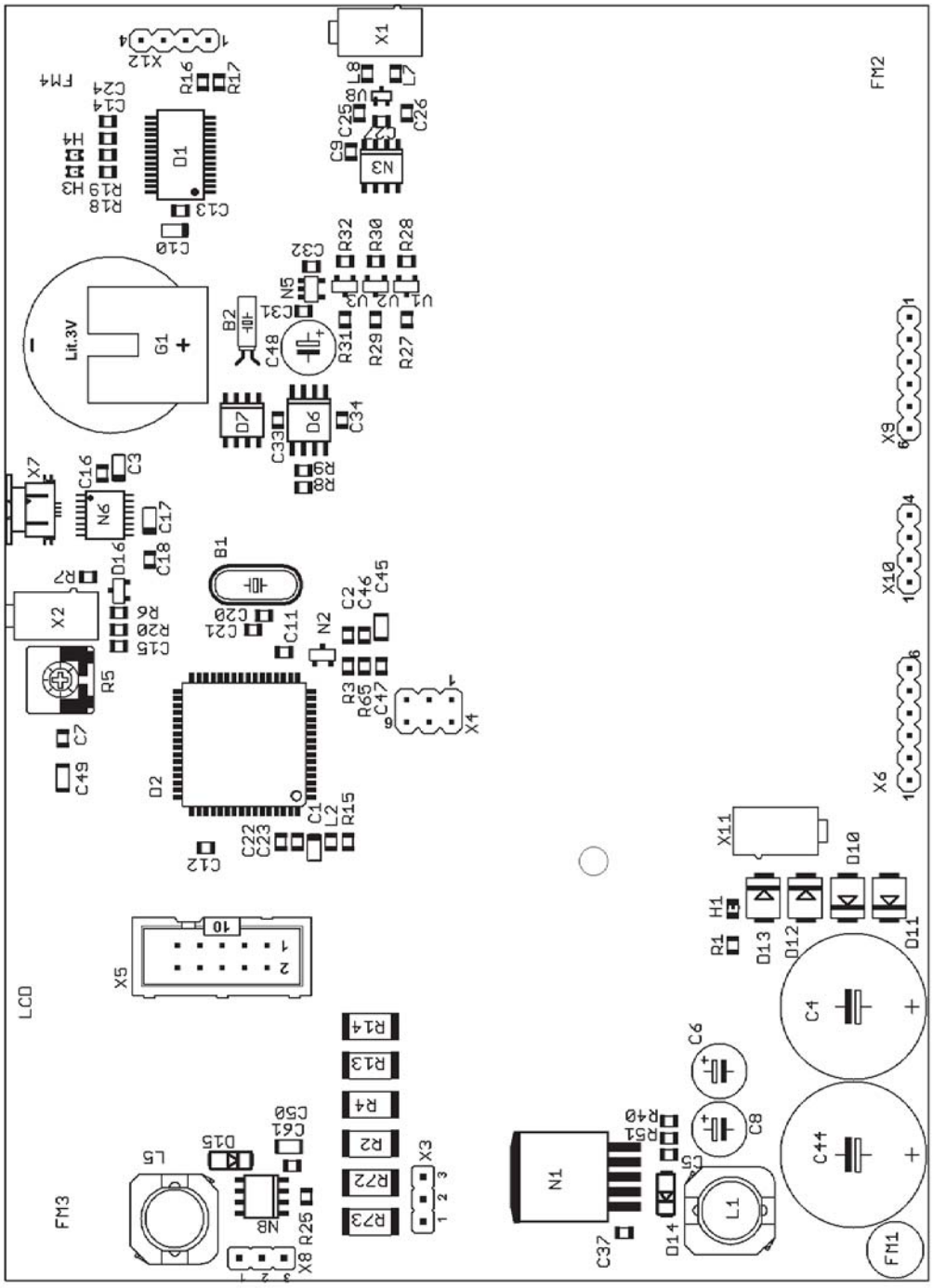
Reference	Hodnota	Popis	Pouzdro	Ks
X5	MLW10G	Konektor	MLW10G	1
X1, X2, X11	MiniFIT_2	Konektor	MiniFIT_2	3
X3, X8	S1G03	Konektor	JP2	2
X10, X12	S1G04	Konektor	MA04-1	2
X4	S2G06	Konektor	MA03-2	1
X6, X9	S1G06	Konektor	MA06-1	2
B1	11,0592 MHz	Krystal	HC49/S	1
B2	32,768 kHz	CRYSTALTC26H	TC26H	1
H5	PG240128WRM-ATA-IY6	LCD Displej	PG240128WRM	1
H1, H3, H4	GREEN	LED SMD	0805	3
C25, C26	NC	NC	0805	2
R2, R4, R13, R14, R72, R73	NC	NC	2512	6
R3	NC	NC	0805	1
C47	NC	NC	0805	1
V8	PESD15VL2BT	Přepěťová ochrana	SOT-23	1
R20	100k	Rezistor SMD	0805	1
R7	10R	Rezistor SMD	0805	1
R8, R9, R15, R17, R27, R28, R29, R30, R31, R32	10k	Rezistor SMD	0805	10
R25	1R8	Rezistor SMD	0805	1
R6, R40	1k	Rezistor SMD	0805	2
R1	220R	Rezistor SMD	0805	1
R18, R19	270R	Rezistor SMD	0805	2
R51	3k	Rezistor SMD	0805	1
R65	3k3	Rezistor SMD	0805	1
R16	4k7	Rezistor SMD	0805	1
L1	150uH	Tlumivka SMD	MSS1038	1
L2	10uH	Tlumivka SMD	0805	1
L5	47uH	Tlumivka SMD	MSS1038	1
L7, L8	BLM18PG471SN1D	Tlumivka SMD	0603	2
V1, V2, V3	BSS138	Tranzistor SMD	SOT23	3
R5	20k	Trimr	CA6V	1

Tab. B.2: Rozpiska součástek DPS RJ-2.0 - pokračování

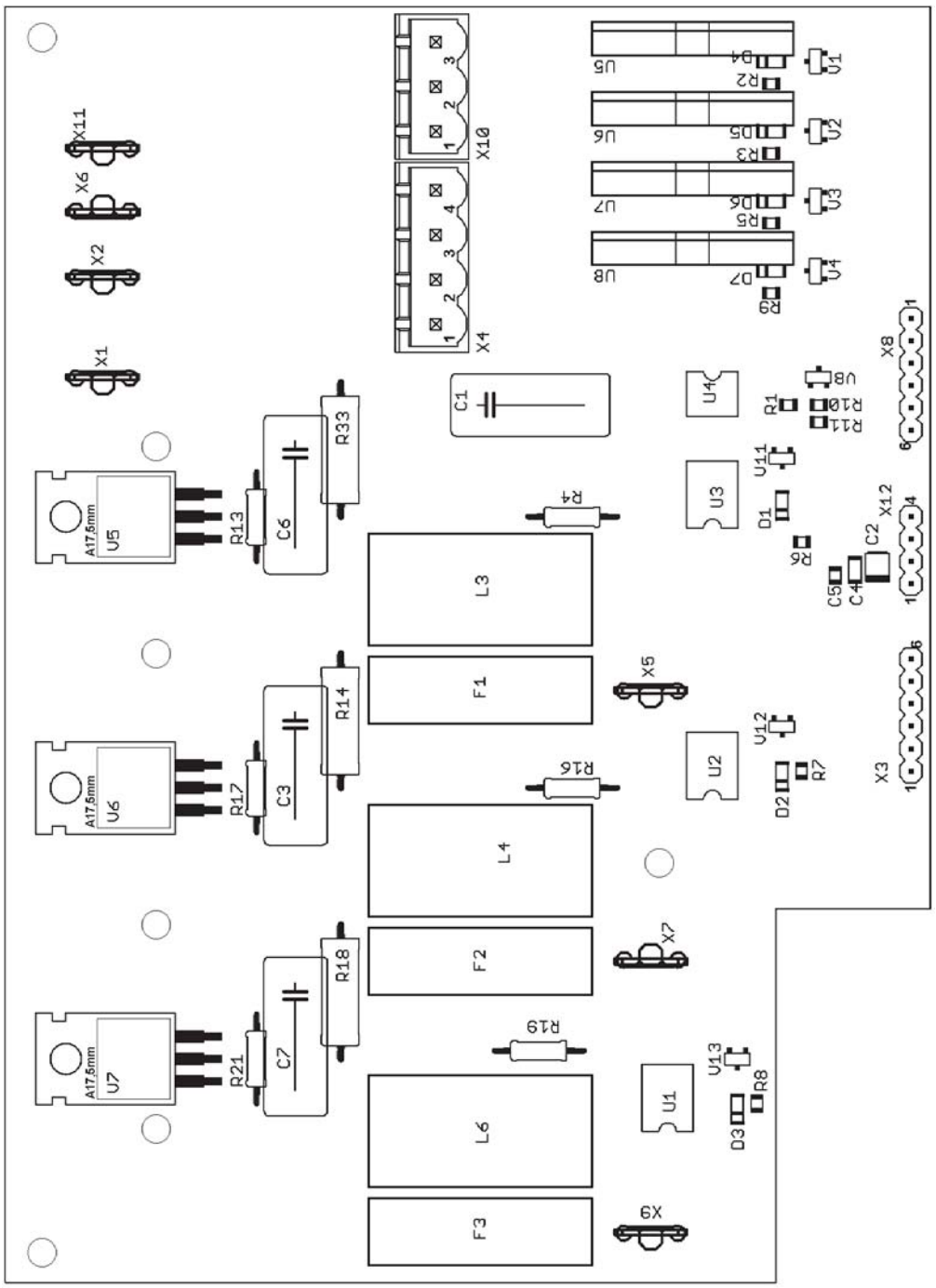
Reference	Hodnota	Popis	Pouzdro	Ks
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7	1N4148	Dioda SMD	SOD80C	7
C1	NC	Kondenzátor	C150-072X183	1
C3, C6, C7	100n/630V	Kondenzátor fól.	C150-072X183	3
C5	0805	Kondenzátor SMD	0805	1
C4	1206	Kondenzátor SMD	1206	1
C2	22u/10V	Kondenzátor SMD	SMC_B	1
X1, X2, X5, X6, X7, X9, X11	FS1536	Konektor	FASTON_6.3	7
X10	MSTBV3	Konektor	MSTBV3	1
X4	MSTBV4	Konektor	MSTBV4	1
X12	MA04-1	Konektor	MA04-1	1
X3, X8	MA06-1	Konektor	MA06-1	2
U4	NC	Optočlen	DIL04	1
U1, U2, U3	MOC3062M	Optotriak	DIL06	3
F1, F2, F3	10A	Pojistka	SHH1A	3
R14, R18, R33	100R/2W	Rezistor	0414	3
R4, R16, R19	0207/XX0207/10	Rezistor	0207	3
R6, R7, R8	270R	Rezistor	0805	3
R13, R17, R21	330R	Rezistor	0207	3
R1, R10, R11, R12	0805	Rezistor	0805	4
R2, R3, R5, R9	0805	Rezistor SMD	0805	4
U5, U6, U7, U8	S102T02	SSR	S102T0X	4
L3, L4, L6	64uH/5A	Tlumivka	SF-T12-40-PF	3
V1, V2, V3, V4, V11, V12, V13	BCR512	Tranzistor	SOT23	7
V8	NC	Tranzistor	SOT23	1
V5, V6, V7	BTA140-800	Triak	TO220CL	3

Tab. B.3: Rozpiska součástek DPS TR-1.0

C OSAZOVACÍ VÝKRESY

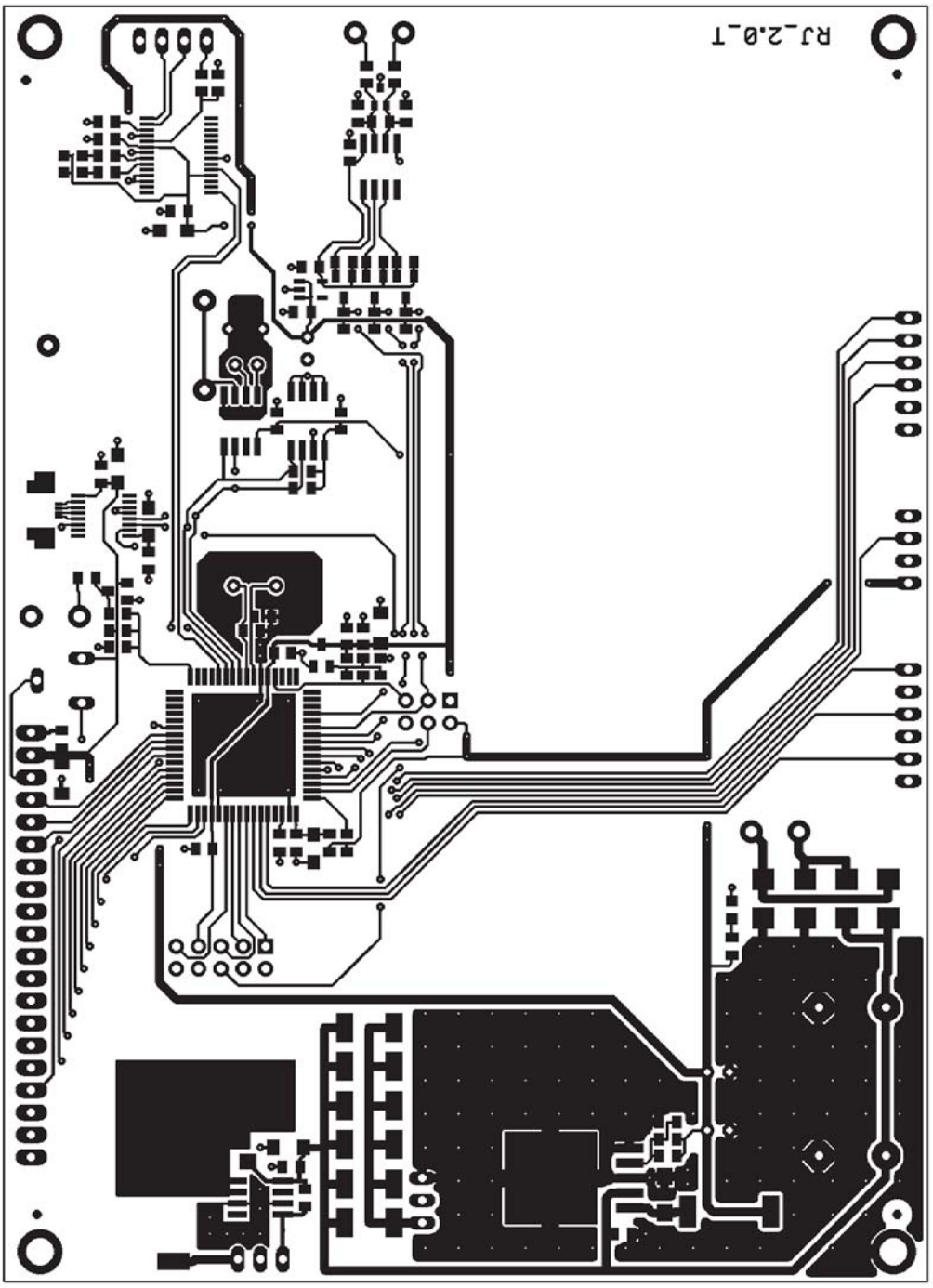


Obr. C.1: Osazovací výkres plošného spoje RJ-2.0

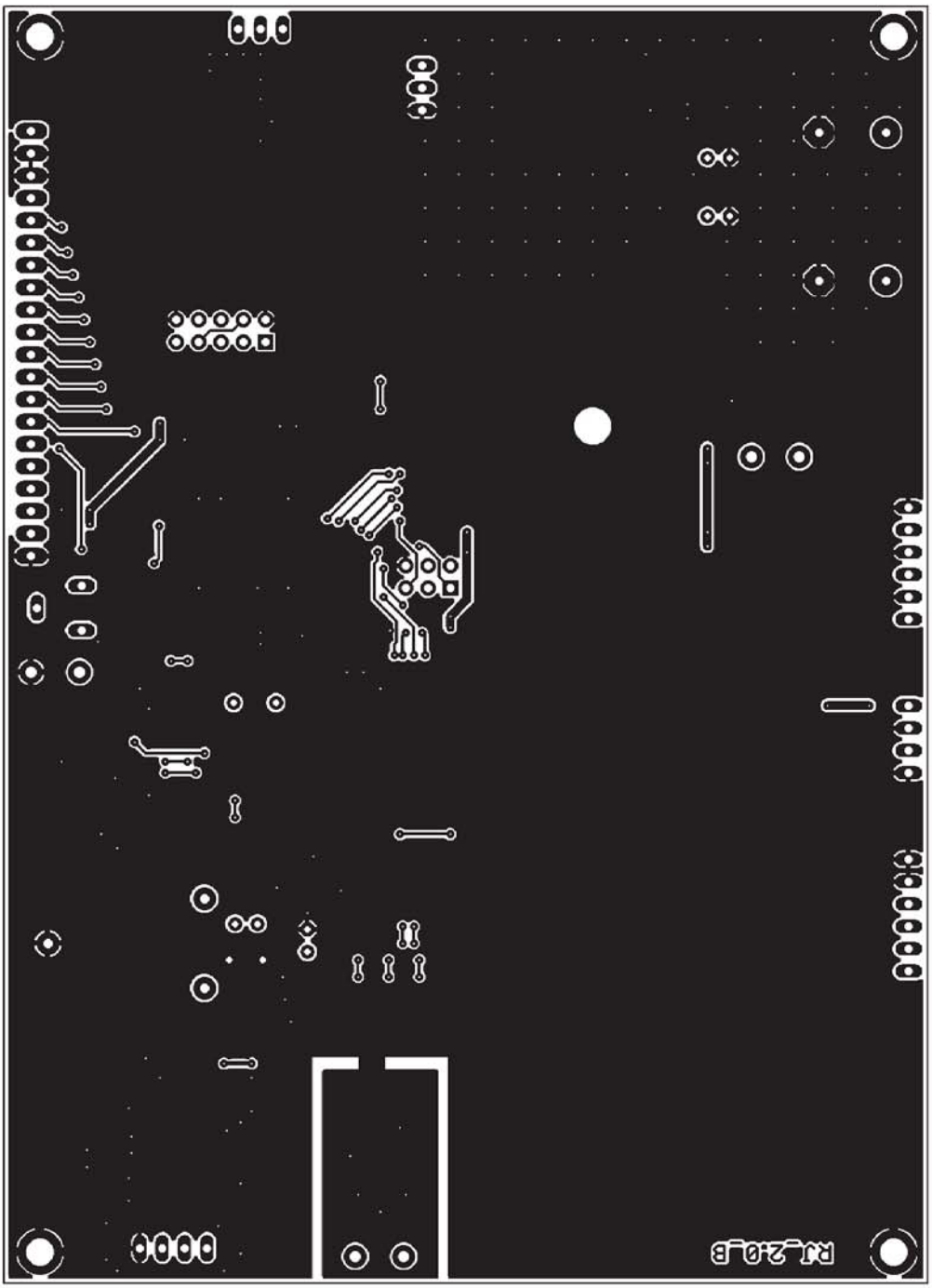


Obr. C.2: Osazovací výkres plošného spoje TR-1.0

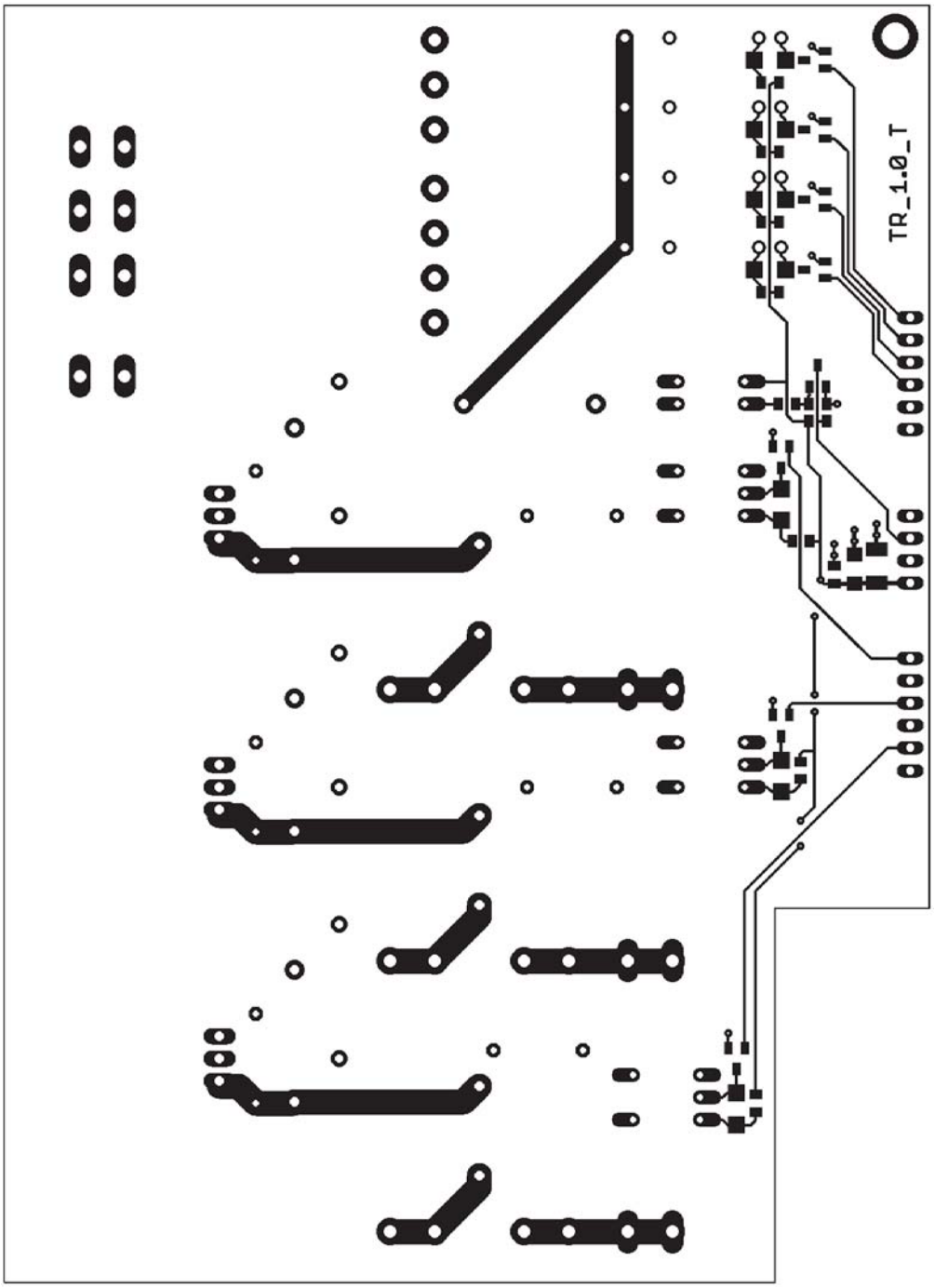
D MOTIVY DPS



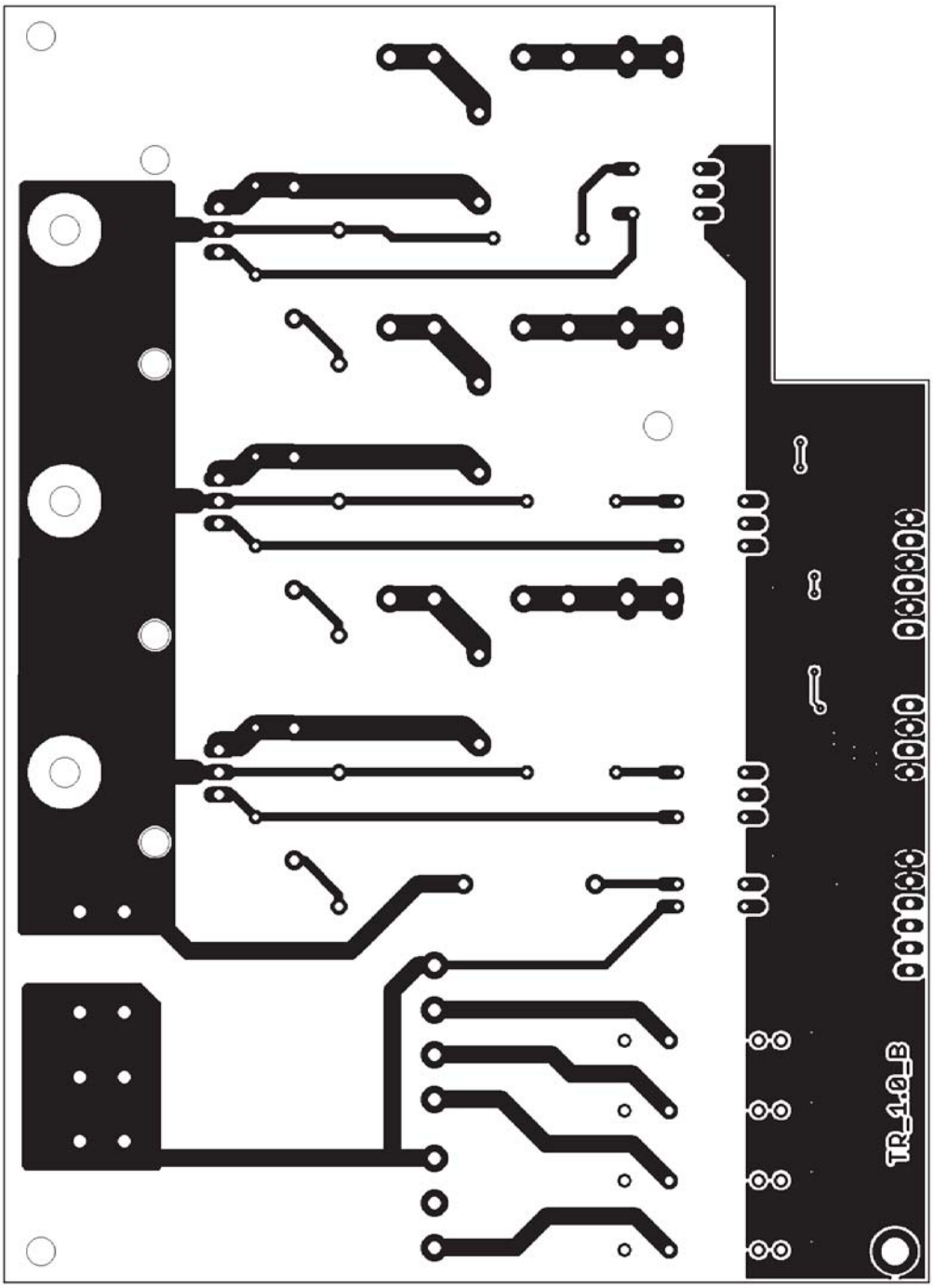
Obr. D.1: Motiv plošného spoje RJ-2.0 - strana top



Obr. D.2: Motiv plošného spoje RJ-2.0 - strana bottom



Obr. D.3: Motiv plošného spoje TR-1.0 - strana top



Obr. D.4: Motiv plošného spoje TR-1.0 - strana bottom

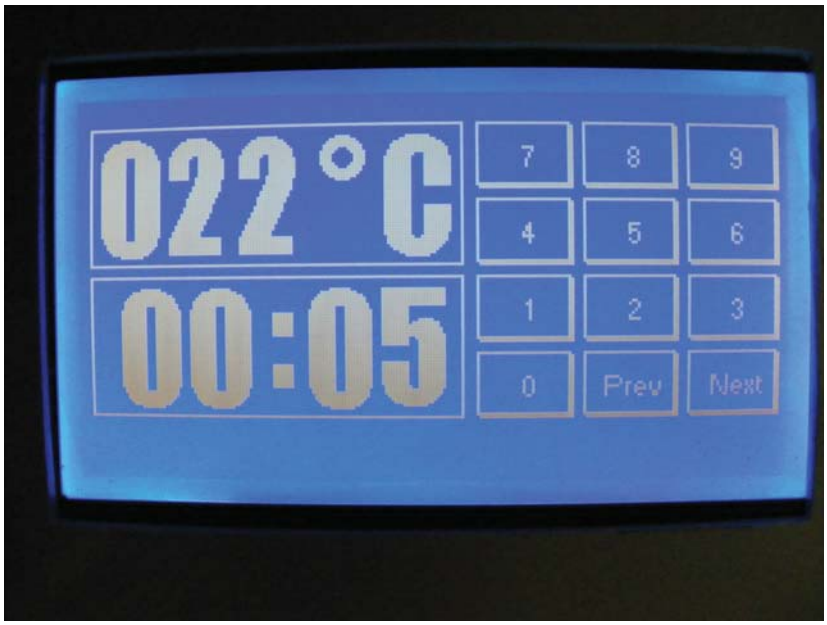
E PODOBA VYPALOVACÍ PECE

Obr. E.1: Vypalovací pec

Obr. E.2: Vypalovací pec

Obr. E.3: Řídící jednotka

Obr. E.4: Obsah displeje



Obr. E.5: Obsah displeje