

Jan Bayer

Odporová pec

Obor číslo 02: Fyzika

Gymnázium Arabská 14, Praha 6
Místo zpracování: Praha

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci zpracoval samostatně za využití uvedených pramenů.

V Praze dne
Jan Bayer

Klíčová slova: elektrický ohřev, mikrokontrolér Picaxe, pec, mufle, hd44780, tavení

Keywords: electric heating, microcontroller Picaxe, furnace, muffle, hd44780, fusion

Anotace: Tato práce pojednává o návrhu a výrobě odporové pece a programovatelné řídicí jednotky. Pec je určena k tavení kovů a pokovování ocelových součástí. Při výrobě byly použity běžně dostupné materiály a malé množství prefabrikátů. Řídicí jednotka ovládá příkon pece a vyhodnocuje teplotu uvnitř pece snímanou termočlánkem. Hlavní část jednotky tvoří mikrokontrolér Picaxe. Ovládání řídicí jednotky je řešeno prostřednictvím klávesnice a LCD displeje. Díky použitému softwaru řídicí jednotky je ovládání pece uživatelsky příjemné.

Annotation: This work deals with the design and construction of electric furnace and programmable control unit. The furnace is designed for melting of metals and plating steel components. For construction of the furnace were used commonly available materials and a small amount of prefabricates. The control unit controls power input of the furnace and evaluate temperature. Temperature is measured by the thermocouple placed inside the furnace. A microcontroller Picaxe is main part of the control unit. A keyboard and LCD display enable the control of the furnace. Controlling the furnace is user-friendly due to the used software of the control unit.

Obsah

1. Úvod.....	5
2. Základní elektrické ohřevy.....	6
3. Řídicí jednotka pece.....	8
3.1 Hlavní spínače.....	9
3.2 Triaky.....	10
3.3 Řídicí obvod topné spirály.....	11
3.4 Znakový LCD displej.....	13
3.5 Klávesnice.....	14
3.6 Mikrokontrolér Picaxe.....	16
3.6.1 Piny mikrokontroléru.....	16
3.6.2 Zdroj pro mikrokontrolér.....	17
3.6.3 Obvod pro naprogramování mikrokontroléru.....	18
3.7 Hlavní deska.....	19
3.8 Sestavení řídicí jednotky.....	22
4. Programování mikrokontroléru.....	24
4.1 Základní principy.....	24
4.2 Rozpoznání tlačítek klávesnice.....	24
4.3 Inicializace LCD.....	25
4.4 Instrukce řadiče LCD.....	26
5. Pecní těleso.....	27
5.1 Topná spirála.....	27
5.2 Napájení pece.....	28
5.3 Mufle a šamotové součásti.....	28
5.4 Plechový obal pece.....	30
5.5 Tepelná izolace pece.....	32
5.6 Měření teploty.....	32
5.7 Víko pece.....	34
5.8 Sestavení pecního tělesa.....	34
6. Stanovení teploty uvnitř mufle.....	35
7. Fotografie hotové pece.....	36
8. Závěr.....	37
9. Použitá literatura.....	38

1. Úvod

Cílem této práce je postavit odporovou pec použitelnou k tavení barevných kovů a k pokovování ocelových součástí. Pec by měla mít nastavitelný průběh teploty v závislosti na čase tak, aby byl možný částečně automatický provoz pece.

Pec je řízena mikrokontrolérem a měla by být schopna poskytovat aktuální údaje o teplotě uvnitř pece. Odporová pec, kterou jsem si dal za cíl vyrobit, bude napájena ze sítě a nebude mít vysoké požadavky na potřebný příkon, aby byl její provoz možný téměř kdekoliv. Svou práci jsem rozdělil celkem do pěti částí podle témat, která rozvíjí.

V první části je nastíněna problematika ohřevů obecně s ohledem na nejpoužívanější koncepce, jejich výhody a nevýhody. Druhá část mé práce se zabývá řídicí jednotkou pece, jak ze stránky teoretické, tak ze stránky výrobní. Třetí část pojednává o některých základních principech použitých při programování mikrokontroléru. Čtvrtá část je věnována konstrukci pecního tělesa. A poslední část se zabývá stanovením teploty uvnitř mufle.

2. Základní elektrické ohřevy

K tavení a zpracování kovů se používají různé druhy ohřevů. Základní principy ohřevů využívané hlavně v průmyslu jsou: indukční ohřev, obloukový ohřev a odporový ohřev.

Indukční ohřev

Při indukčním ohřevu dochází k ohřátí feromagnetického materiálu pomocí vířivých proudů. Tyto vířivé proudy vznikají působením nestacionárního elektromagnetického pole. Nestacionární elektromagnetické pole je v indukčních pecích vytvářeno střídavým proudem procházejícím vinutím, které v ideálním případě tvoří rezonanční obvod s kondenzátorem. Rezonanční obvod vytvořený tímto způsobem zvyšuje účinnost indukční pece.

Mezi výhody tohoto typu ohřevu patří například to, že ohříváný předmět je ohříván přímo vířivými proudy a teplo se tedy neztrácí při přenosu vzduchem nebo jiným médiem z ohřívacího vinutí na předmět, jako je tomu například u většiny odporových ohřevů. Z tohoto důvodu je také možné u výkonnějších indukčních pecí použít ke chlazení indukčního vinutí (které je většinou z měděné trubky) chladicí médium, které proudí přímo vinutím.

Obloukový ohřev

Při obloukovém ohřevu dochází k ohřevu materiálu pomocí elektrického oblouku, který vzniká mezi ohříváním materiálem a většinou uhlíkovou elektrodou.

Výhodami tohoto typu ohřevu jsou možnost dosažení vysoké teploty a relativně jednoduchá konstrukce zařízení.

Mezi nevýhody obloukového ohřevu patří jeho vysoké nároky na dodávanou energii a obtížně regulovatelná teplota. Teplota v obloukové peci se většinou reguluje množstvím elektrických oblouků tavících materiál.

Odporový ohřev

Ohřev materiálu je způsoben průchodem elektrického proudu buď přímo ohříváním materiálem, nebo topnou spirálou.

Mezi výhody odporového ohřevu patří jednoduchost a možnost relativně přesně regulovat teplotu.

Nevýhodou je například složité uložení topné spirály a z toho plynoucí vysoké nároky na vlastnosti tepelné izolace nebo relativně omezená maximální teplota, které je pec schopna dosáhnout. Tato teplota se většinou pohybuje do 1900°C.

Odporové pece můžeme rozdělit na několik druhů:

1. S přímým ohřevem, kdy je materiál ohříván procházejícím proudem. V praxi se tento způsob ohřevu používá hlavně při tavení materiálů s vysokou teplotou tavení.

2. S nepřímým ohřevem pomocí topné spirály navinuté na muflí, do níž se vkládá materiál k ohřátí. Tato koncepce je využívána hlavně k tavení barevných kovů a k tepelnému zpracování oceli.

3. Topná spirála je uložena v prostoru uvnitř pece. Prostor uvnitř pece je většinou obezděn drážkovanými cihlami, v kterých je topná spirála umístěna. Toto uspořádání se využívá například u pecí pro vypalování keramiky.

Pro stavbu odporové pece jsem se rozhodl hlavně proto, že teplotu uvnitř pece lze řídit o mnoho lépe, než u obloukových pecí, a zároveň je snazší tuto teplotu i měřit, než je tomu u indukčního ohřevu. Krom toho v indukčním ohřevu nelze ohřívát jiné než feromagnetické materiály.

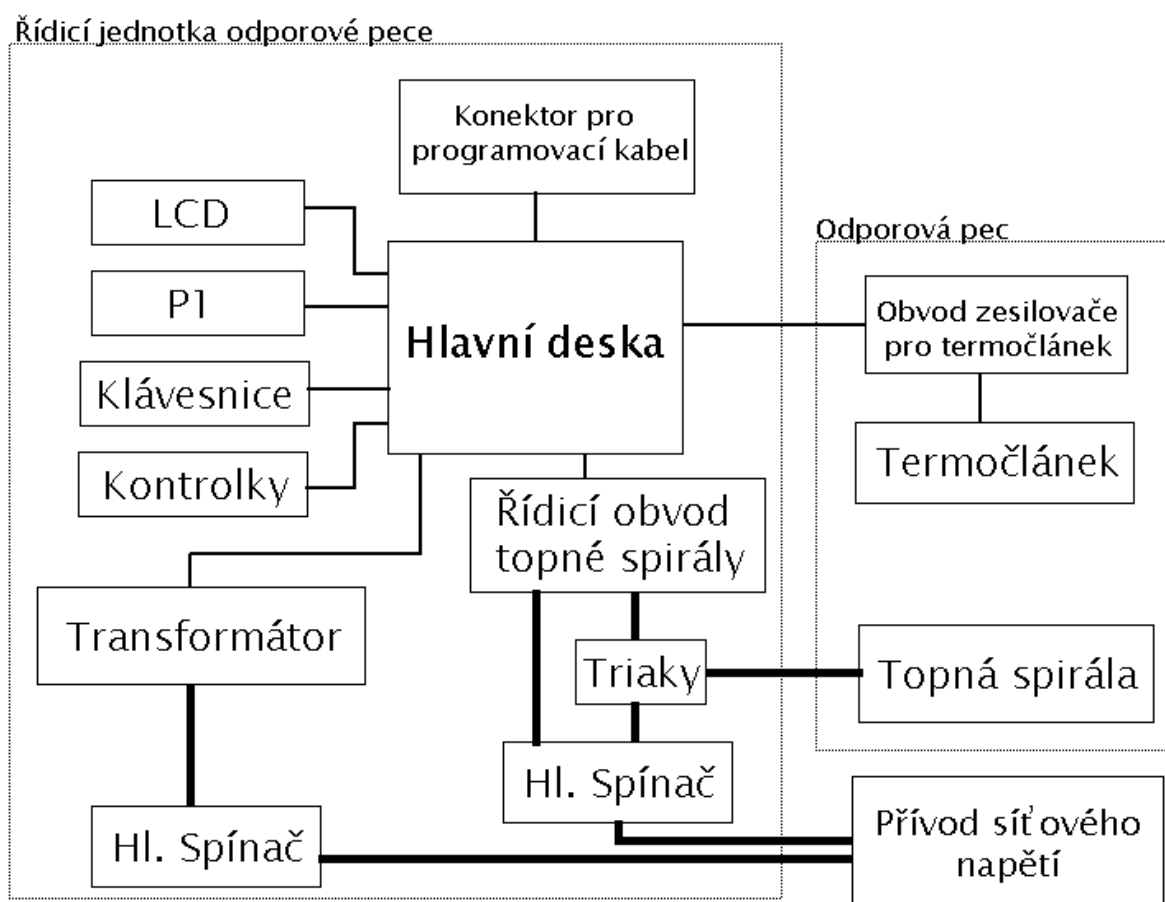
Dvě výše zmíněné nevýhody indukčního ohřevu lze samozřejmě vyvrátit například tím, že dovnitř indukčního ohřevu umístíme feromagnetický kelímek, od kterého se materiál bude ohřívat a jehož teplotu budeme měřit. Potom lze i v indukční peci tavit i například neferomagnetické nebo dokonce nekovové materiály. Avšak vylepšeními, kterými bychom takto odstraňovali nedostatky indukčního ohřevu, bychom značně zkomplikovali konstrukci pece a funkcí se přiblížili ohřevu odporovému.

Rozhodl jsem se tedy pro stavbu odporové pece s muflí. Topnou spirálu jsem umístil dovnitř muflle. Pec je napájena síťovým napětím, které je do topné spirály přiváděno pulzně z řídicí jednotky. Pec jsem rozdělil do dvou částí. První z těchto částí je řídicí jednotka pece, která pec řídí. Druhou z částí je pecní těleso, které tvoří muflle s topnou spirálou, izolace, termočlánek se zesilovačem a obal s izolací.

3. Řídicí jednotka pece

Řídicí jednotka pece je určena k řízení pece pomocí dávkování pulzů síťového napětí. Zpětnou vazbu o teplotě v peci zajišťuje termočlánek. K peci se řídicí jednotka připojuje síťovým napájecím kabelem a kabelem pro termočlánek.

Řídicí jednotka je sestavena z několika částí, které budou popsány v průběhu této kapitoly, jejich vzájemné propojení zachycuje obr.3.0.1. Části, ze kterých se řídicí jednotka odporové pece skládá, mají následující funkce: Hlavní spínače slouží k zapínání pece. Transformátor napájí celý systém řízení. Mikrokontrolér na hlavní desce vyhodnocuje stav pece. Řídicí jednotka zobrazuje stav pece pomocí kontrolky a LCD displeje. Pec je možné ovládat pomocí klávesnice a potenciometru P1. Pro přeprogramování pece lze využít konektoru pro programovací kabel. Dávkování pulzů síťového napětí potom zajišťuje řídicí obvod topné spirály spolu s triaky.

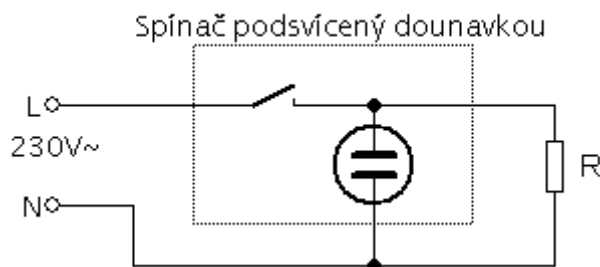


Obr.3.0.1: Propojení jednotlivých součástí řídicí jednotky. Silně jsou vyznačeny přívody síťového napětí 230V.

3.1 Hlavní spínače

Hlavními spínači, které jsem použil do panelu, je možné ovládat přívod síťového napětí do přístroje. Spínače jsem použil celkem dva: první spínač (S1) jsem použil pro ovládání přívodu síťového napětí do zdroje pro mikrokontrolér. Druhý spínač (S2) jsem použil pro ovládání přívodu síťového napětí do obvodu, který ovládá topnou spirálu.

Jako hlavní spínače jsem zvolil spínače dvoupolohové kolébkové podsvícené doutnavkami. Bylo by možné použít i spínače se žárovkovým podsvícením, avšak tento typ podsvícení bývá většinou napájen napětím 12V. Napájení 12V by mé zapojení učinilo složitějším. Doutnavky z podsvícení spínačů lze totiž napájet přímo síťovým napětím. Zapojení doutnavek a spínačů jsem zrealizoval podle obr. 3.1.1. Spínače jsou samozřejmě dimenzovány na spínání proudů vyšších, než jaké budou procházet danou částí obvodu, kterou spínají. Spínač S1 dokáže spínat proudy¹ do 3A a spínač S2 do 15A.



Obr.3.1.1: Zapojení spínače s doutnavkovým podsvícením. R je zátěž například topná spirála s řídicím obvodem. Fázový vodič je označen L a střední vodič N.

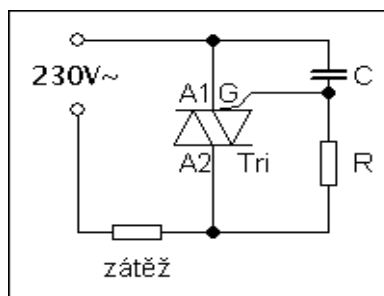
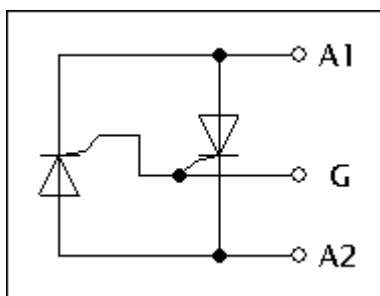
¹ Proudů jsou udávány pro napětí 250V.

3.2 Triaky

Pro řízení topné spirály napájené síťovým napětím, je nejvýhodnější použít triaky, které oproti tyristorům umožňují spínat proud a tím řídit výkon v obou půlvlnách střídavého napětí.

Triak je pětivrstvý polovodič, který funguje stejně jako dva antiparalelně zapojené tyristory se společnou řídicí elektrodou G. Elektrody A1 a A2 jsou anody, mezi nimiž dochází k sepnutí v závislosti na řídicím napětí. Řídicí napětí musí být přivedeno mezi řídicí elektrodu G a „přilehlou anodu“ („přilehlá anoda“ je na obr.3.2.2 anoda A1). Nejjednodušší způsob, jak triak sepnout, je přivést spínané napětí na řídicí elektrodu způsobem naznačeným na obr.3.2.2. Triaky lze samozřejmě spínat také napětím značně nižším, než je napětí spínané. Já jsem však pro řízení pece využil spínání triaků pomocí síťového napětí. Rozepnutí sepnutého triaku nastane při přirozené komutaci² síťového napětí.

Síťové napětí přivedené na řídicí elektrodu ovládám pomocí opticky řízeného triaku, čímž mám galvanicky oddělenou výkonovou část pece napájenou síťovým napětím od řídicích obvodů. Toto oddělení je velmi výhodné z hlediska bezpečnosti a rušení řídicích obvodů. Opticky řízený triak (tzv. optotriak) funguje podobně jako normální triak, rozdíl je pouze v tom, že u optotriaku sepnutí není způsobeno velikostí řídicího napětí, ale elektromagnetickým zářením dopadajícím na dané místo.



Obr.3.2.1: Antiparalelní zapojení dvou tyristorů. Obr.3.2.2: Tyristor sepnutý síťovým napětím.

Triaky, které jsem ve své konstrukci použil, jsou typu BTB12/600BW v pouzdře TO220. Pouzdro TO220 je výhodné, protože umožňuje snadnou montáž na chladič pomocí jednoho šroubu. Nevýhodou tohoto pouzdra však je, že při montáži na chladič, dojde k vodivému spojení triakové elektrody A2 s chladičem. Z tohoto důvodu je bezpečnější přivést fázový vodič na elektrodu A1. Ale pokud bychom triak sepnuli, fázový vodič by byl opět spojen s chladičem. Abych tomuto zabránil, umístil jsem silikonové izolační podložky pod triaky a plastické distanční podložky pod matky šroubů, kterými jsou triaky k chladiči uchyceny.

Nevýhodou tohoto technického řešení je, že silikonová podložka snižuje tepelnou vodivost přechodu mezi triakem a chladičem. Ale i přesto se triaky chladí dostatečně i při dlouhodobějším zatížení³.



Obr.3.2.3: Triak s izolační podložkou.

2 Přirozená komutace je změna polarity na konci první půlperiody střídavého napětí se sinusovým průběhem.

3 Toto bylo zjištěno při testech celé pece.

3.3 Řídicí obvod topné spirály

Řídicí obvod topné spirály ovládá, podle informace získané z mikrokontroléru, triaky. Triaky potom spínají síťové napájení topné spirály.

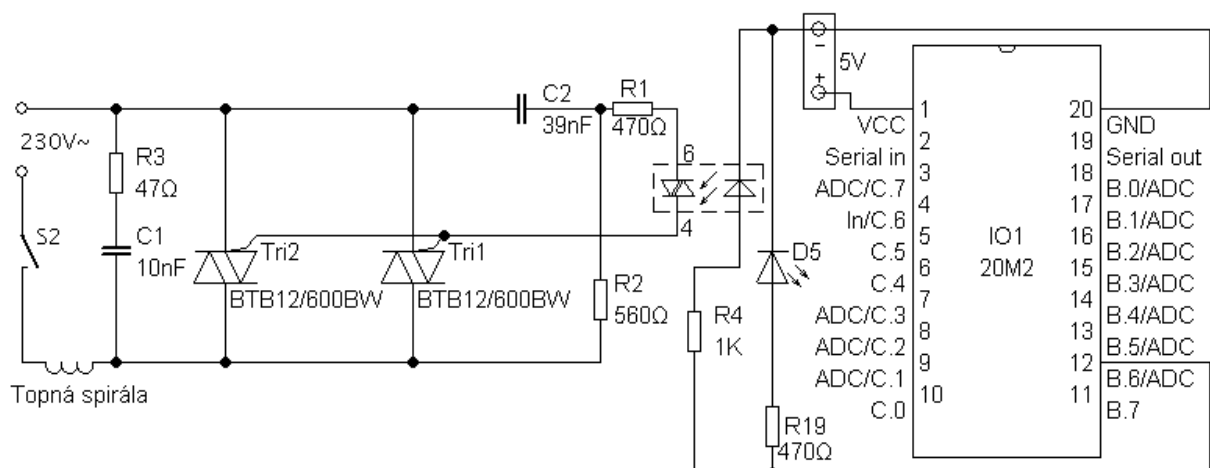
Pro spínání topné spirály, jsem ve své práci zvolil dva triaky BTB12/600BW v paralelním zapojení, aby se zdvojnásobila hodnota maximálního spínatelného proudu (proudu ve směru A1 – A2 nebo A2 – A1) a zároveň, aby při zatížení docházelo k menšímu zahřívání jednotlivých triaků. Vycházím z testu, kdy jeden triak BTB12/600BW jsem zatížil po dobu půl hodiny. Zátěž měla příkon přibližně 1,4kW a triak ji spínal vždy na 0,75s s intervaly dlouhými 4s. Triak se po takovémto půlhodinovém provozu zahřál na teplotu 33°C. (Teplota okolí byla 22°C a testovaný triak byl přišroubován k hliníkovému chladiči o povrchu 110 cm².) Z tohoto experimentu jsem usoudil, že bude vhodnější použít dva triaky. Při použití dvou paralelně zapojených triaků k jejich přílišnému zahřívání nedochází.

Tedy není potřeba k chlazení triaků použít aktivní chlazení, ani pokud by měly triaky pracovat v sepnutém stavu nepřetržitě, což vzhledem ke zvolenému způsobu⁴ řízení pece nepředpokládám.

K ovládní řídicího napětí na triacích BTB12/600BW jsem použil obvod MOC3022, který obsahuje optotriak s optickým spínáním v jednom pouzdře. Hodnoty součástek R1, R2, R3, C1, C2 na obr.3.3.1 vychází z [2] a patří do řady hodnot E12. (Řada, z jejichž hodnot se vychází, při výrobě elektronických součástek.) Minimální hodnotu rezistoru R4 jsem vypočetl ze vztahu:

$$R_{min} = \frac{U}{I_m} = \frac{5}{0,01} = 500\Omega$$

kde U je napájecí napětí mikrokontroléru Picaxe 20M2 a I_m je maximální proud pro optické spínání optotriaku. Hodnota rezistoru R4 tedy musí být rozhodně větší než 500Ω a měla by být rovna hodnotě z řady E12. Já jsem použil hodnotu rezistoru 1kΩ, ale lze použít například i hodnotu 680Ω. K hodnotě rezistoru R19 jsem dospěl analogicky. Je však nutné počítat i s tím, že součet proudů protékajících přes rezistory R4 a R19 nesmí překročit 20mA⁵, což je při použitých hodnotách dodrženo.



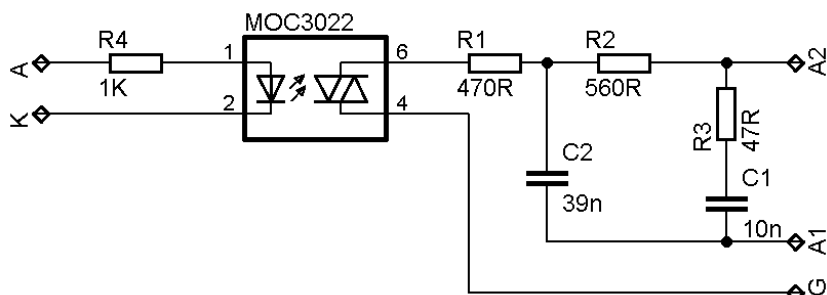
Obr.3.3.1: Obvod s triaky spínající topnou spirálu a jeho připojení k mikrokontroléru Picaxe 20M2.

4 Pec je řízena pulzně, nedochází tedy k sepnutí triaků na dobu delší než několik vteřin.

5 Maximální proud který může procházet přes výstup mikrokontroléru.

Realizace řídicího obvodu topné spirály

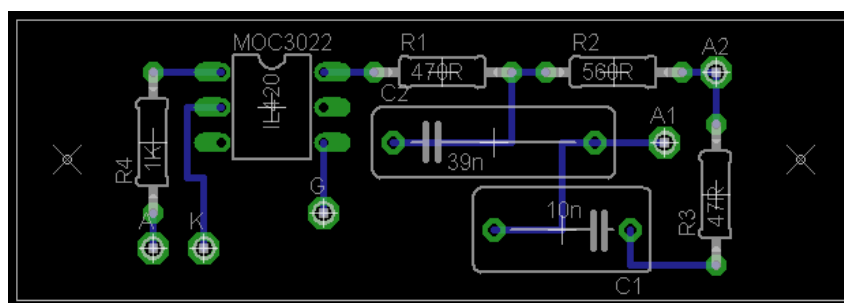
Předpokládám, že přístroj budu v budoucnu upravovat, a tak jsem se rozhodl obvod určený k řízení topné spirály umístit na samostatný plošný spoj. Umístěním obvodu, který je napájen střídavým síťovým napětím, na samostatný plošný spoj, je také sníženo riziko rušení obvodu s mikrokontrolérem. Schéma řídicího obvodu topné spirály jsem upravitel pro výrobu plošného spoje následovně:



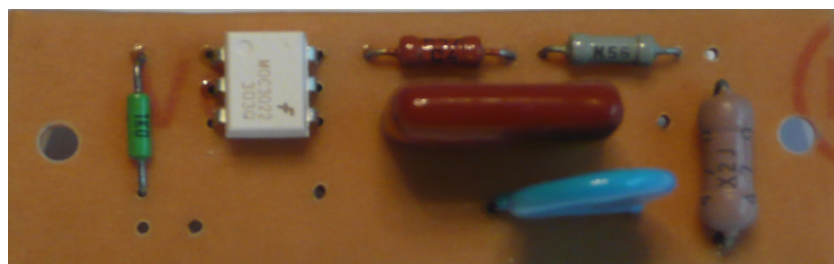
Obr.3.3.2: Schéma plošného spoje pro řídicí obvod topné spirály.

Kondenzátory C2 a C1 musí být dimenzovány na napětí minimálně 230V~. Ze schématu na obr.3.3.2 jsou vypuštěny triaky BTB12/600BW, protože nebudou umístěny na plošném spoji, ale jsou přišroubovány k chladiči mimo plošný spoj, ke kterému jsou připojeny přes vývody označené A1, A2 a G. Topná spirála je jedním koncem připojena k elektrodám A2 na triacích a druhým koncem k nulovému vodiči. Fázový vodič je připojen na elektrody triaků A1.

Vývod z plošného spoje pod označením A (anoda LED integrované v obvodu MOC3022) slouží pro připojení k mikrokontroléru, přičemž logická 1 na tomto vývodu způsobí zapnutí topné spirály (log. 0 topnou spirálu vypíná). Vývod K je určen k připojení LED na záporný pól 5V zdroje.



Obr.3.3.3: Plošný spoj řídicího obvodu topné spirály. (Pohled ze strany součástek.)



Obr.3.3.4: Součástkami osazený plošný spoj řídicího obvodu topné spirály.

3.4 Znakový LCD displej

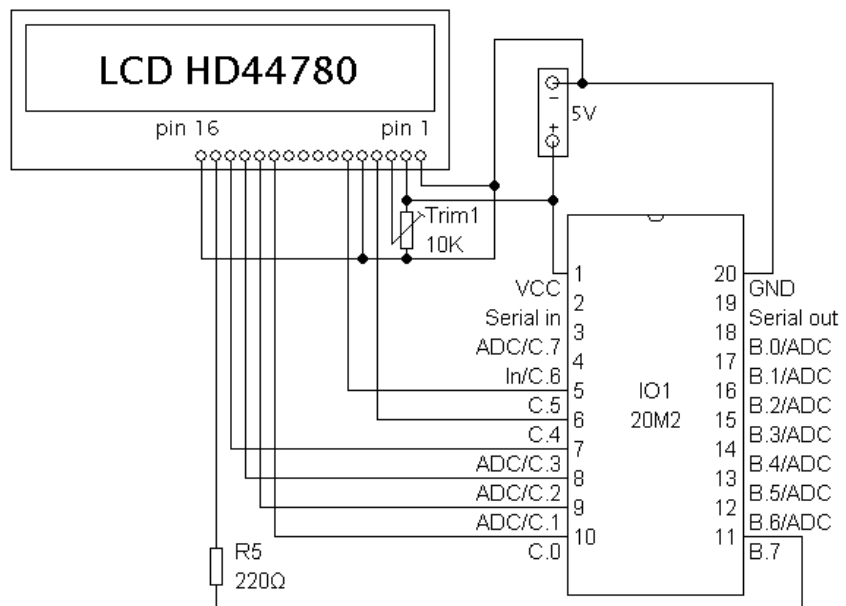
Pro zobrazení teplot a nastavení ovládání spojeného s pecí jsem se rozhodl použít jako zobrazovací jednotku znakový LCD displej s řadičem S6A0069. Řadič S6A0069 je řadičem ekvivalentním s řadičem hd44780, který je široce používaný a kompatibilní s většinou ostatních řadičů používaných pro obsluhu znakových LCD displejů. Dále již budu popisovat pouze řadič hd44780.

Pro řídicí jednotku pece jsem použil displej se dvěma řádky po dvaceti znacích. Následující popis ovládání a připojení LCD displeje k mikrokontroléru je optimalizovaný mým požadavkům na řídicí jednotku, LCD lze použít a ovládat mnoha jinými způsoby, které zde nebudu uvádět.

Připojení k mikrokontroléru

Jelikož k ovládání řídicí jednotky chci použít mikrokontrolér Picaxe 20M2, jehož počet I/O pinů⁶ je 16⁷, je výhodné použít při spojení LCD displeje a mikrokontroléru co nejmenší počet datových a ovládacích pinů displeje. Z tohoto důvodu jsem mezi displejem a mikrokontrolérem použil 4-bitovou komunikaci namísto 8-bitové a k ovládání displeje mikrokontrolérem nepoužívám R/W pin⁸. 4-bitová komunikace využívá pouze 4 I/O piny oproti 8-bitové, která jich využívá 8. K připojení displeje k mikrokontroléru nakonec postačí 6 I/O pinů a 1 I/O pin pro ovládání podsvícení.

pin	symbol	Popis pinu
1	VSS	Napájení -5V
2	VDD	Napájení +5V
3	VO	Nastavení kontrastu
4	RS	0-instrukce, 1-data
5	R/W	0-zápis, 1-čtení
6	E	Odeslání dat
7	DB0	Spodní polovina datového bytu
8	DB1	
9	DB2	
10	DB3	
11	DB4	Horní polovina datového bytu
12	DB5	
13	DB6	
14	DB7	
15	A	LED podsvícení anoda
16	K	LED podsvícení katoda



Obr.3.4.1: Připojení LCD displeje s řadičem k mikrokontroléru picaxe 20M2.

Tab.3.4.1: Popis pinů LCD.

6 I/O pin je vstup nebo výstup ovladatelný mikrokontrolérem.

7 Pokud nepočítáme Sériový vstup a výstup, tyto piny jsou využívány při přeprogramování mikrokontroléru.

8 R/W pin je vývod z displeje umožňující zjistit, dokončil-li displej zadanou instrukci. (tzv. čtení příznaku busy flag) Pokud však víme, jak dlouho trvá danou instrukci vykonat, není třeba zjišťovat je-li již instrukce dokončena.

Nastavení připojeného LCD

Podsvícení u řádkových LCD displejů je tvořeno LED diodou, v tomto případě mám anodu LED podsvícení připojenou na výstup z mikrokontroléru B.7, přes který mohou podsvícení ovládat. Samozřejmě je třeba omezit proud pro LED podsvícení rezistorem. Použil jsem rezistor o velikosti 220Ω.

Nastavení kontrastu u LCD displeje se provádí pomocí trimu Trim1. Pokud nehodláme kontrast měnit nebo chceme ušetřit místo, je možné tento trimr nahradit rezistorem připojeným mezi pinem VO a záporným pólem napájecího napětí. Jak již bylo uvedeno výše, R/W pin není použit k ovládání displeje přímo mikrokontrolérem, a tak, aby na tomto pinu byla logická nula⁹, je připojen na záporný pól napájecího zdroje. Popis ostatních pinů LCD je uveden v Tabulce 3.4.1.

3.5 Klávesnice

Mikrokontrolér se znakovým LCD displejem je třeba nějak ovládat. K ovládání jsem zvolil kombinaci potenciometru (určeného hlavně pro nastavování teplot) a klávesnice. Původně jsem zamýšlel použít počítačovou klávesnici připojenou přes PS2 port. Ale toto řešení se ukázalo jako nepraktické, vzhledem k velikosti klávesnice a faktu, že k ovládání pece není potřeba tolik tlačítek. Rozhodl jsem se vyrobit klávesnici vlastní.

Klávesnici k ovládání mikrokontroléru jsem použil osmitlačítkovou, což plně postačuje pro pohodlné ovládání pece. Avšak z důvodu velmi omezeného počtu I/O pinů mikrokontroléru, nebylo možné připojit každé tlačítko klávesnice na jeden I/O pin. Proto jsem použil klávesnici fungující na principu několikanásobného děliče napětí.

Každému tlačítku je přiřazen rezistor s rozdílnou ohmickou hodnotou. Při stisku tlačítka dojde ke vzniku děliče napětí. Potom toto napětí přivedeme z děliče na ADC vstup mikrokontroléru. Napětí přivedené na ADC vstup mikrokontroléru pak mikrokontrolér změří a přiřadí mu 8-bitové číslo. Na základě 8-bitového čísla dojdeme pak ke zjištění, které tlačítko bylo stisknuto.

Napětí přivedené na vstup mikrokontroléru spočítáme z rovnice:

$$U_{ADC} = \frac{U}{R_{RX} + R_{R17}} \cdot R_{R17}$$

8-bitové číslo přiřazené tomuto napětí mikrokontrolérem potom vypočítáme z rovnice:

$$N_{8-bit} = \frac{256 U_{ADC}}{U}$$

kde U je napětí zdroje, R_{RX} je odpor rezistoru přiřazeného určitému tlačítku.(R10-R16)

Po dosazení do rovnice pro výpočet 8-bitového čísla získáme vztah:

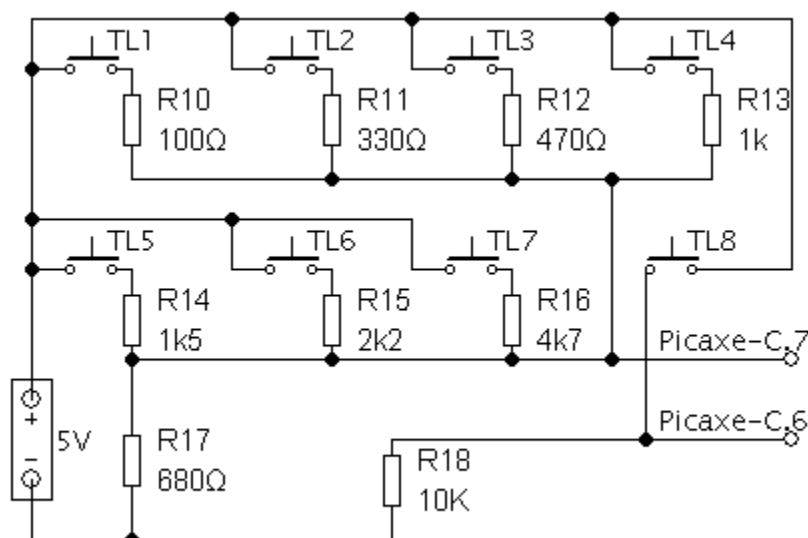
$$N_{8-bit} = \frac{256 U \cdot R_{R17}}{U \cdot (R_{RX} + R_{R17})} = \frac{256 R_{R17}}{R_{RX} + R_{R17}}$$

V této rovnici zanedbávám toleranci rezistorů, která se může projevit tak, že hodnota 8-bitového čísla naměřená mikrokontrolérem, se bude od hodnoty takto vypočtené lišit. V případě mnou použitých rezistorů, se vypočtená hodnota liší od naměřené hodnoty mikrokontrolérem maximálně o 3. Což je také důvod, proč hodnoty 8-bitových čísel nepočítám, ale rovnou měřím mikrokontrolérem.

⁹ Log. 0 na R/W pinu LCD umožňuje ovládání LCD.

Tlačítko	TL1	TL2	TL3	TL4	TL5	TL6	TL7
R_{RX} Pro dané tlačítko	100 Ω	330 Ω	470 Ω	1k Ω	1,5k Ω	2,2k Ω	4,7k Ω
8-bitové číslo ¹⁰	223	172	152	100	80	61	32

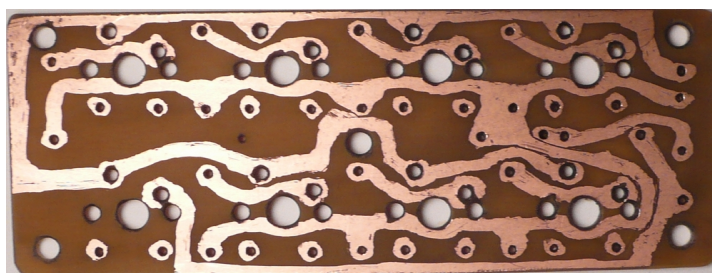
Tab.3.5.1: Hodnoty 8-bitových čísel přiřazených daným tlačítkům.



Obr.3.5.1: Klávesnice tvořená sedmi tlačítky (TL1 - TL7) zapojenými do obvodu na principu děliče napětí. Tlačítko TL8 je samostatně připojeno na vstup mikrokontroléru běžným¹¹ způsobem.

Realizace klávesnice

Klávesnici jsem z konstrukčních důvodů zrealizoval na samostatném plošném spoji. Tlačítka jsem použil typu tlačítek počítačové klávesnice. Aby byla tlačítka vzájemně ve správné poloze, svrtal jsem díry pro tlačítka se šablonou. (Šablonu jsem vyrobil z počítačové klávesnice.) Poté jsem vytvořil zbylé díry a plošný spoj dokončil.



Obr.3.5.2: Neosazený plošný spoj klávesnice. (Jedno tlačítko je vždy usazeno do jedné skupiny děr, po sedmi dírách.)

¹⁰ Získané z měření mikrokontroléru.

¹¹ Tedy při stisku tlačítka je na vstup mikrokontroléru přivedeno napětí zdroje. (Picaxe vyhodnotí jako log. 1.)

3.6 Mikrokontrolér Picaxe

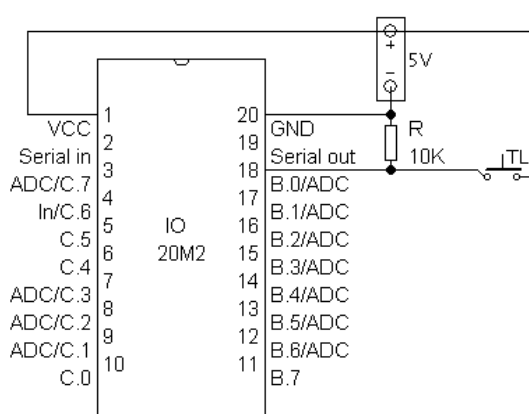
K řízení odporové pece jsem použil mikrokontrolér Picaxe, který má relativně velký počet ADC převodníků, které jsou schopny až 10-bitového čtení. Mikrokontroléry Picaxe se snadno používají a jejich cena není příliš vysoká. Pro řízení pece jsem použil konkrétně mikrokontrolér picaxe 20M2. Ten však může být nahrazen vývojově lepší verzí Picaxe 20X2, která disponuje například dvojnásobnou pamětí.

3.6.1 Piny mikrokontroléru

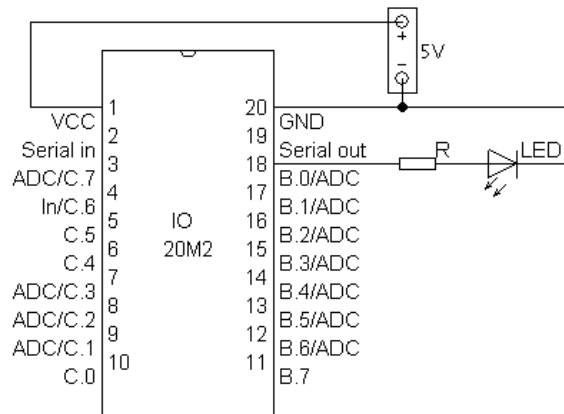
Mikrokontrolér Picaxe 20M2 disponuje relativně velkým počtem pinů, většinou nastavitelných jako vstupy nebo výstupy.

Vstup mikrokontroléru funguje následovně. Pokud přivedeme na pin mikrokontroléru, nastavený jako vstup, záporný pól napájecího napětí, mikrokontrolér vyhodnotí tento stav logickou 0. Ale pokud přivedeme kladný pól napájecího napětí na vstup, mikrokontrolér toto vyhodnotí logickou 1.

Výstup mikrokontroléru funguje obráceně. Přiřadíme-li výstupu logickou 1, napětí na výstupním pinu bude mít hodnotu kladnou, rovnou napětí napájecímu. Avšak přiřadíme-li výstupu mikrokontroléru logickou 0, nebo není-li výstupu přiřazena logická 1, napětí na výstupu bude mít hodnotu zápornou.



Obr.3.6.1.1: Příklad použití pinu B.0 jako vstupu.



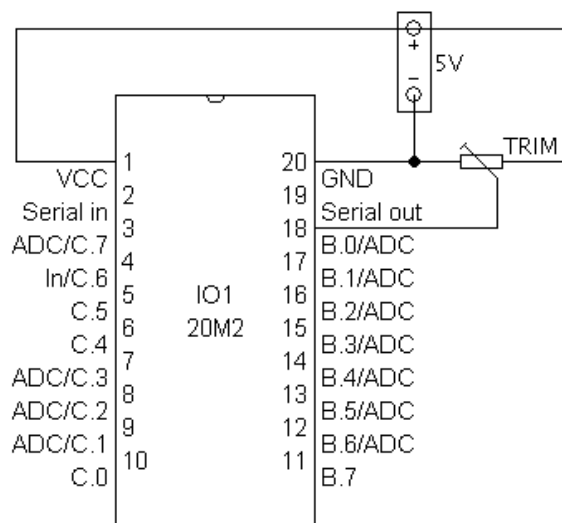
Obr.3.6.1.2: Příklad použití pinu B.0 jako výstupu.

Na obr.3.6.1.1 je příklad použití vstupu mikrokontroléru k detekování stavu tlačítka TL. Není-li tlačítko sepnuto, na vstupu B.0 je detekována log. 0. Což je způsobeno rezistorem R, který při vypnutém tlačítku udržuje na vstupu log. 0. Hodnota rezistoru R se většinou používá 10k Ω , ale lze použít například i 4,7k Ω , avšak odběr proudu při sepnutí tlačítka bude větší. Dojde-li k sepnutí tlačítka, na vstup je přivedeno napětí +5V a mikrokontrolér toto vyhodnotí log. 1.

Obr.3.6.1.2 je příkladem použití výstupu mikrokontroléru k ovládání LED diody. LED se rozsvítí, pokud je na výstupu nastavena log. 1, a zhasne, pokud je na výstupu nastavena log. 0. Jestliže bychom LED diodu zapojili tak, že katoda by byla připojena na výstup B.0 přes rezistor a anoda LED diody by byla připojena na kladný pól zdroje, LED dioda by při log. 0 svítila a při log. 1 by nesvítila.

U pinů mikrokontroléru Picaxe 20M2 lze využít dalších vlastností, které značně rozšiřují možnosti použití mikrokontroléru. Některé vstupy umožňují použití ADC

převodníku. ADC převodníky umožňují mikrokontroléru převést velikost napětí naměřeného mikrokontrolérem na ADC vstupu na n-bitové číslo (kde n je u mikrokontrolérů Picaxe nastavitelné na hodnotu 8 nebo 10). Velikost napětí na ADC vstupu je měřena oproti referenčnímu napětí.



Obr.3.6.1.3: Použití vstupu s ADC převodníkem.

Na obr.3.6.1.3 je příklad použití ADC převodníku k detekování natočení trimu. Trim TRIM zafunguje jako dělič napětí, výsledné napětí je z trimru přivedeno na vstup¹² mikrokontroléru. ADC převodník mikrokontroléru pak velikost napětí na vstupu mikrokontroléru, převede na osmi nebo deseti bitové číslo. V případě osmibitového čísla je číselný rozsah převodu 0-255 a v případě převodu na desetibitové číslo je číselný rozsah 0-1023. Pokud tedy budeme otáčet trimem z jedné krajní polohy do druhé, z ADC převodníku dostaneme postupně čísla 0-255 (při převodu na osmibitové číslo).

3.6.2 Zdroj pro mikrokontrolér

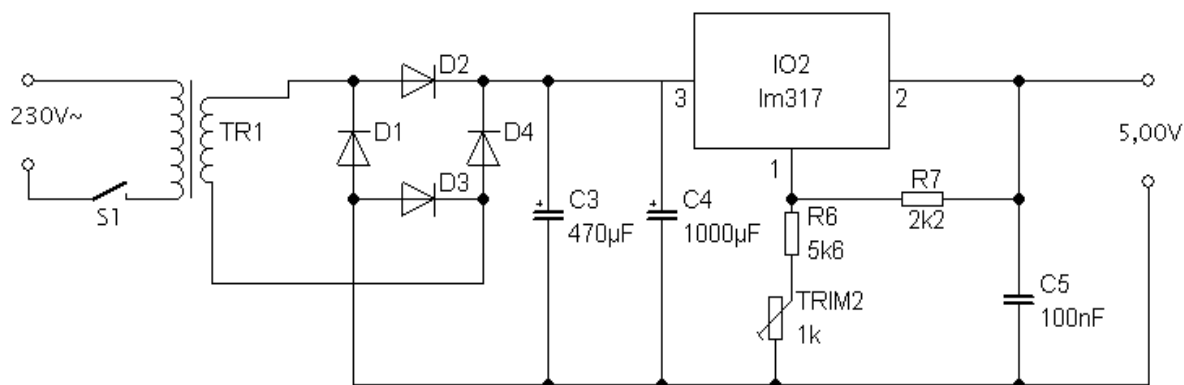
Jelikož mikrokontrolér používá ADC převodníky, které pro přesné čtení vyžadují co největší stabilitu referenčního napětí¹³, je potřeba dobře stabilizovaný zdroj s přesně nastavitelným výstupním napětím. Jako stabilizátor jsem použil stabilizátor lm317. Obvod zdroje pro mikrokontrolér se skládá ze dvou hlavních částí.

První část zdroje se skládá z transformátoru TR1, na jehož primární vinutí je přes hlavní spínač S1 přivedeno síťové napětí. Na sekundárním vinutí je napětí bez zátěže přibližně 18,5V. Po usměrnění střídavých 18,5V diodami D1-D4 a vyhlazení kondenzátory C3 a C4 se toto napětí zvýší na zhruba 26V. (Kondenzátory C3 a C4 by proto měly být dimenzovány minimálně na 35V.) Transformátor TR1 je možné nahradit téměř jakýmkoliv transformátorem, který je schopen transformovat napětí 230V na XV. Přičemž X musí být takové, aby napětí na vstupu do obvodu lm317 bylo z intervalu (7;40)V.

Druhá část zdroje je tvořena obvodem lm317 a součástkami R6, R7, TRIM2 a C5. Součástky R6, R7 a TRIM2 slouží jako dělič napětí, kterým je definováno napětí výstupní. Trimem TRIM2 lze tento dělič napětí nastavit tak, aby na výstupu bylo napětí přesně 5V.

¹² Vstup musí umožňovat použití ADC převodníku.

¹³ U mikrokontrolérů picaxe je referenční napětí pro ADC převodníky většinou zároveň napětím napájecím.

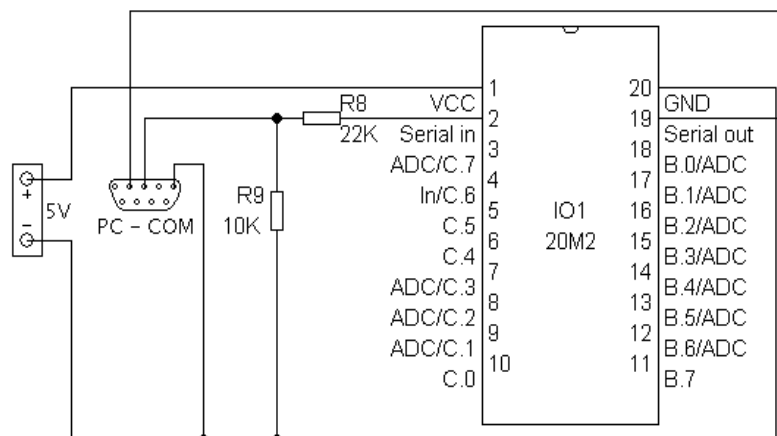


Obr.3.6.2.1: Napájecí zdroj pro mikrokontrolér se stabilizátorem lm317.

3.6.3 Obvod pro naprogramování mikrokontroléru

Mikrokontroléry typu Picaxe je možné naprogramovat dvěma základními způsoby. Buď přes USB kabel nebo přes počítačový port COM. Využil jsem naprogramování přes port COM, protože tento způsob připojení je nejjednodušší z hlediska zapojení programovacího kabelu¹⁴.

Mikrokontroléry Picaxe umožňují tzv. „in circuit programming“. To znamená, že mikrokontrolér můžeme přeprogramovat, aniž bychom jej vyjmuli z daného elektrického obvodu. „In circuit programming“ je výhodný hlavně z uživatelského hlediska, protože není potřeba při každé změně programu složitě rozebírat přístroj a mikrokontrolér vyjmát z patice. Aby bylo možné použít „in circuit programming“, je nutno zapojit mikrokontrolér podle schématu na obr.3.6.3.1. Při nahrávání programu z počítače do mikrokontroléru, musí být zapnuto napájení mikrokontroléru.



Obr.3.6.3.1: Připojení mikrokontroléru Picaxe 20M2 k počítači přes port COM.

¹⁴ Programovací kabel umožňuje spojení portu COM v počítači a mikrokontroléru.

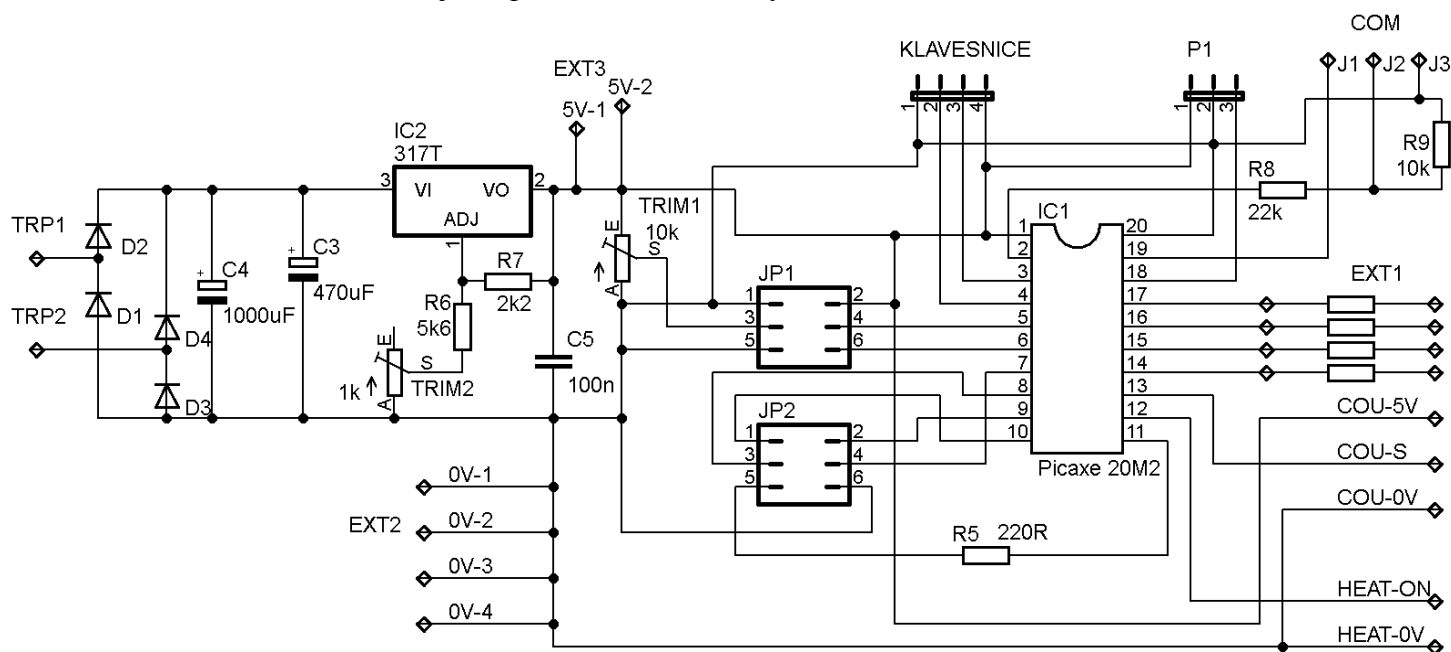
3.7 Hlavní deska

Hlavní deskou jsem nazval plošný spoj, na kterém je připájena patice pro mikrokontrolér picaxe. Tento plošný spoj je základem celé řídicí jednotky a propojuje většinu jejích částí. (Grafické znázornění propojení hlavní desky s ostatními částmi pece je zobrazeno na obr.3.0.1.) Hlavní deska tedy ovládá kontrolky, LCD displej a řídicí obvod topné spirály. Hlavní deska také vyhodnocuje informace z termočlánu, klávesnice a potenciometru P1.

Realizace hlavní desky

Z obrázku 3.7.2 je vidět, že hlavní deska obsahuje některé z obvodů (nebo jejich částí), které jsou popsány na předchozích stranách. Těmito obvody jsou: zdroj pro mikrokontrolér, obvod pro připojení LCD k mikrokontroléru Picaxe a obvod pro „in circuit programming“. Některé z těchto obvodů jsem z praktických/konstrukčních důvodů upravil.

U obvodu zdroj pro mikrokontrolér jsem transformátor TR1 a spínač S1 umístil mimo plošný spoj hlavní desky. Obvod pro „in circuit programming“ jsem příliš nezměnil, pouze jsem kabel do počítače zakončený konektorem COM nahradil konektorem do panelu Jack 3,5 (samičí), do kterého se při přeprogramování připojuje programovací kabel. Programovací kabel slouží jako redukce z konektoru Jack 3,5mm na konektor COM . Obvod pro připojení LCD k mikrokontroléru jsem ponechal beze změny.



Obr.3.7.2: Schéma plošného spoje hlavní desky.

Popis částí schématu na obr. 3.7.2:

Část zdroje

Transformátor zdroje je připojen přes vývody označené TRP1 a TRP2. Kondenzátor C3 má nižší hodnotu, aby i výška této součástky byla nižší a aby bylo možné vedle hlavní desky umístit transformátor TR1. Stabilizátor lm317 jsem použil s pouzdem TO220, které umožňuje montáž chladiče. Chladič jsem však nepoužil, protože nepředpokládám, že se stabilizátor bude zahřívat při odběru desítek mA.

Část připojení LCD

Jelikož jsem LCD display umístil do panelu, je k hlavní desce připojen dvojicí plochých kabelů následujícím způsobem: Na hlavní desce jsou dvě oblasti označené JP1 a JP2¹⁵ a v nich jsou připájeny dva ploché kabely. Ploché kabely jsou zakončeny dvouřadou dutinkovou lištou tak, že je možné je připojit k dvouřadě Jumper liště, která je připájena přímo na LCD.

Klávesnice, Potenciometr P1

Klávesnice a Potenciometr ovládání se připojuje podobně jako LCD až na to, že Jumper lišta s kolíky je na hlavní desce a ploché kabely zakončené dutinkami jsou připájeny ke klávesnici, respektive potenciometru.

„In circuit programming“ a termočlánek

Připojení termočlátku i kabelu pro přeprogramování mikrokontroléru jsem zrealizoval pomocí dvou konektorů Jack 3,5mm. Oba použité konektory (Jack) jsou samičí konektory do panelu.

Výstup ovládající řídicí obvod topné spirály

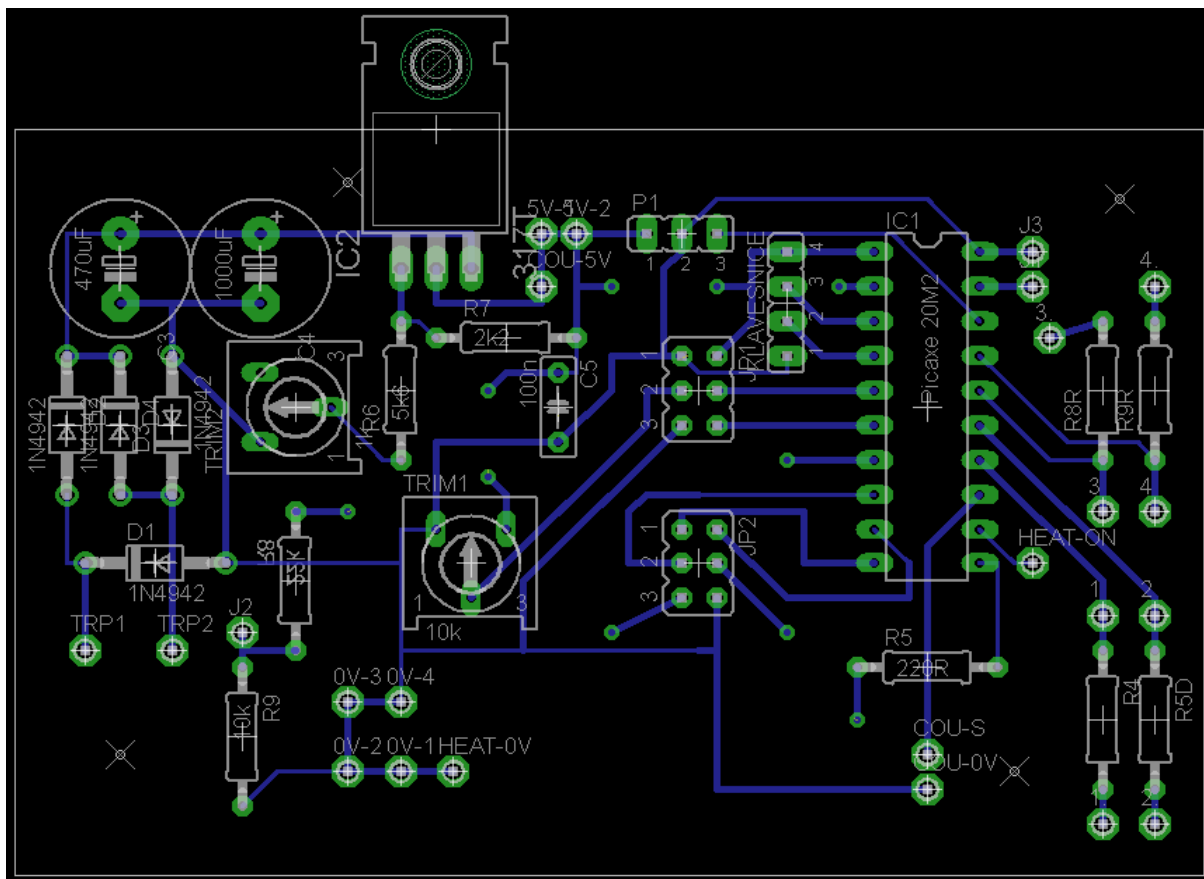
Tento výstup je určen pro ovládání řídicího obvodu topné spirály a také pro ovládání LED kontrolky signalizující sepnutí optotriaku¹⁶.

EXT1, EXT2 a EXT3

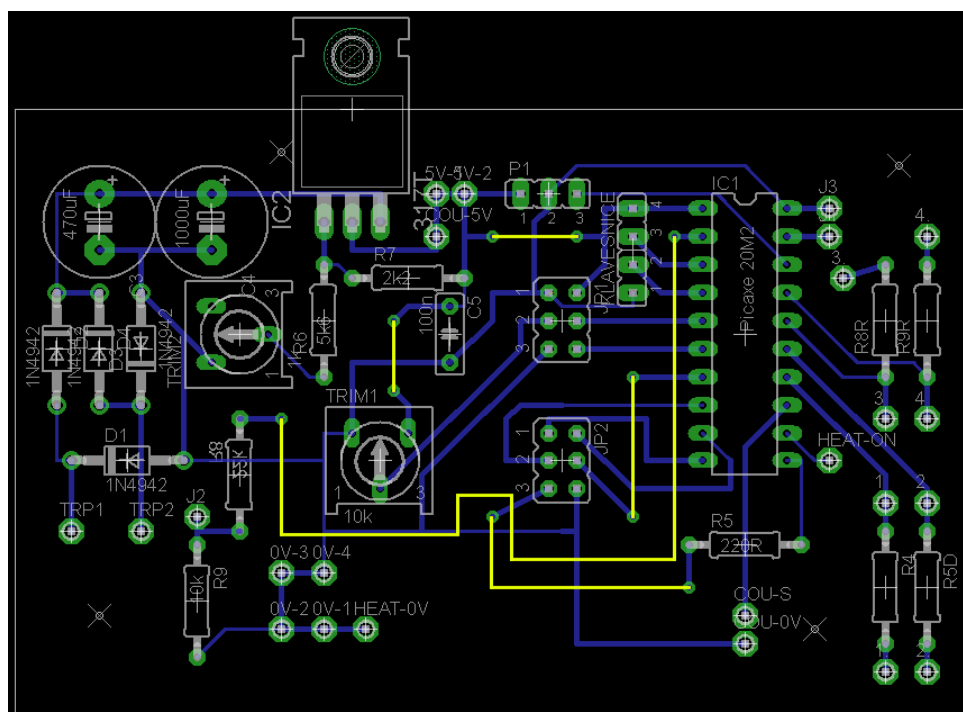
Tato označení jsou použita pro celkem tři části plošného spoje hlavní desky, které jsou ponechány pro kontrolky nebo jiná rozšíření přístroje.

15 Oblasti jsou označeny JP1 a JP2, protože je možné je osadit Jumper lištami.

16 Pokud jsou zapnuty oba hlavní spínače, potom zmíněná LED kontrolka signalizuje ohrev topné spirály.



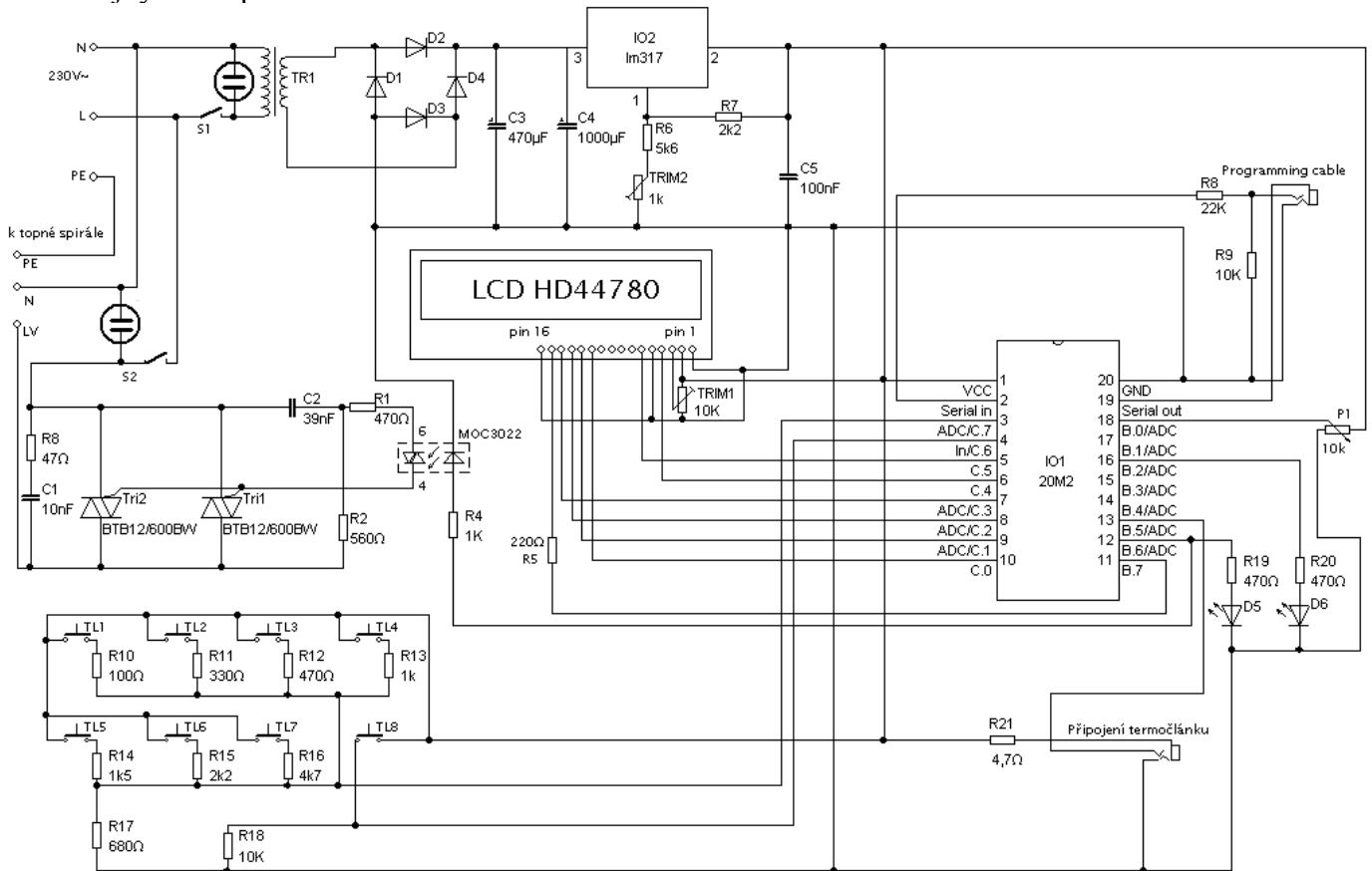
Obr.3.7.3: Plošný spoj hlavní desky. (Pohled ze strany součástek.)



Obr.3.7.4: Plošný spoj hlavní desky se žlutě vyznačenými drátovými propojkami.

3.8 Sestavení řídicí jednotky

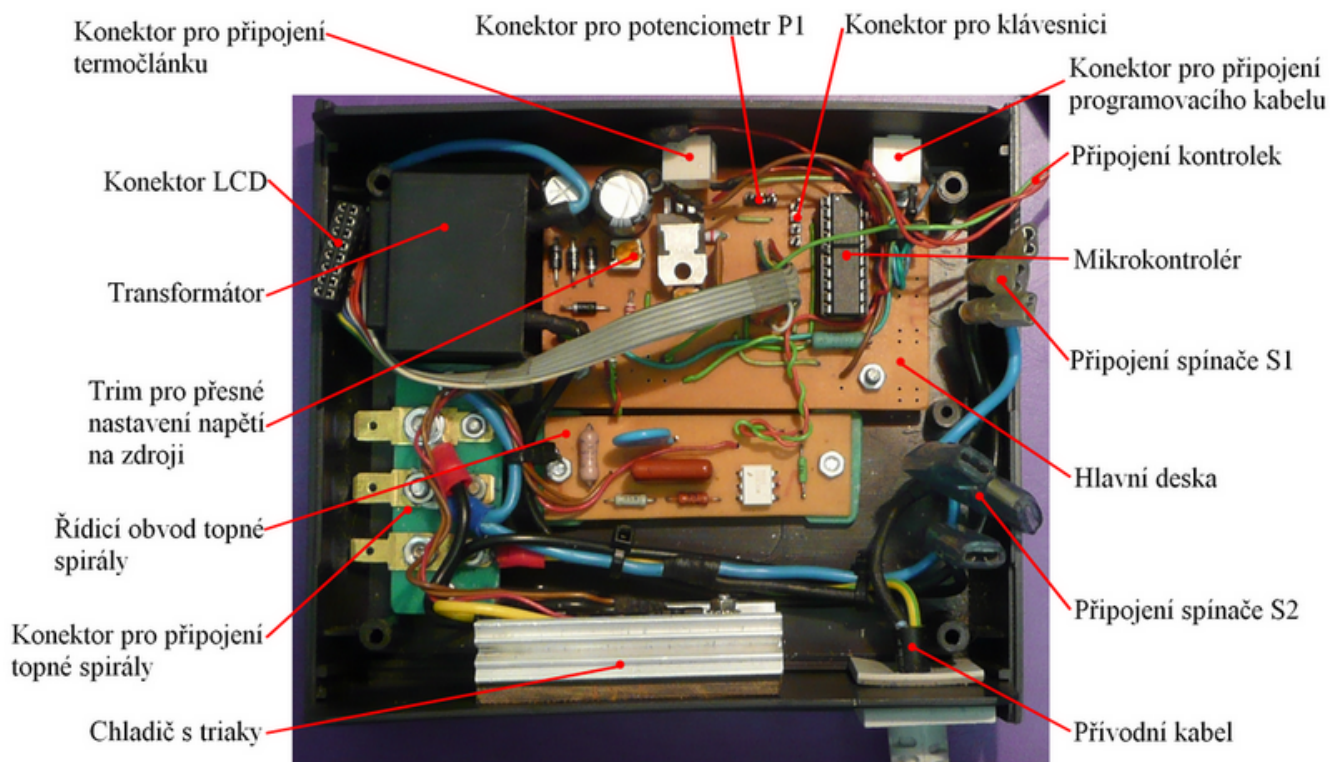
Řídicí jednotku jsem umístil do polystyrenové krabice typu kp-06 s vnějšími rozměry přibližně 150x50x130mm. Uspořádání plošných spojů a dalších komponentů jsem zvolil na základě jejich rozměrů, a to s ohledem na co nejnižší zkreslení měřené teploty a co nejvyšší bezpečnost.



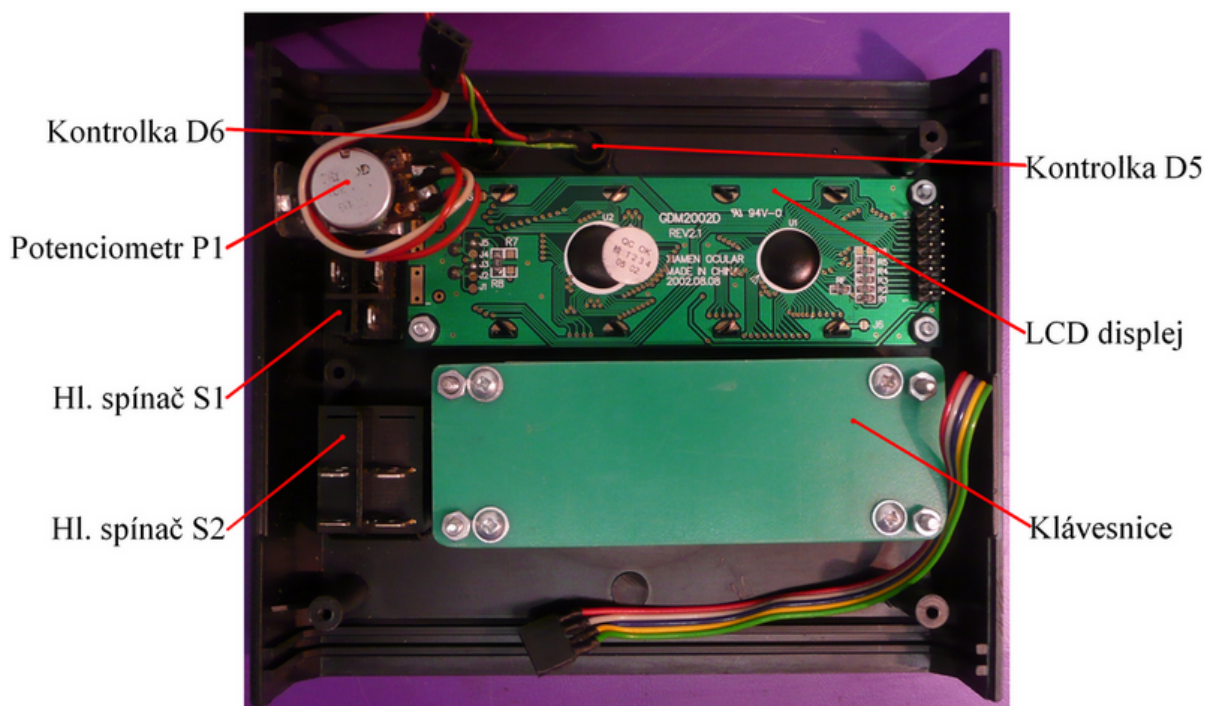
Obr.3.8.1: Celkové schéma řídicí jednotky.

V celkovém schématu je několik částí, které dosud nebyly popsány. LED dioda D6 je zelená kontrolka umístěná na řídicím panelu vedle kontrolky D5. Rezistor R20 omezuje proud protékající kontrolkou D6. Další část, která nebyla popsána je část s vývody pro připojení k topné spirále. Topná spirála a kostra pece jsou k řídicí jednotce připojeny přes trojlinku. Trojlinkou prochází: ochranný vodič (PE), střední vodič (N) a fázový vodič spínaný řídicí jednotkou (LV). Tuto trojlinku lze od řídicí jednotky odpojit, protože je zakončena dvěma konektory faston 6,3x0,8mm a jedním konektorem faston 4,8x0,8mm¹⁷.

17 Jiný rozměr třetího konektoru byl použit záměrně, aby se zabránilo záměně ochranného vodiče za vodič fázový nebo střední.



Obr.3.8.2: Spodní část krabice, v níž je instalovaná řídicí jednotka.



Obr.3.8.3: Vrchní část krabice, v níž je instalována řídicí jednotka. (pohled zespodu)

4. Programování mikrokontroléru

V této kapitole popíše nejdůležitější části programu pro obsluhu odporové pece. Program nebudu popisovat do podrobnosti celý, protože jej neustále vylepšuji. Uvedené části programu lze použít i pro některé jiné mikrokontroléry Picaxe, ale primárně jsou určeny pro verzi Picaxe 20M2.

4.1 Základní principy

paměť EEPROM

Paměť EEPROM pro ukládání dat, je v mikrokontroléru Picaxe 20M2 oddělena od paměti, do níž se ukládá program (narozdíl od mikrokontroléru například Picaxe 08M, kde může dojít ke kolizi ukládaných dat s programem). Velikost paměti EEPROM pro ukládání dat je 256 bytů. Použil jsem ji k uložení většiny textů, které se zobrazují na displeji a k ukládání nastavení, která se zachovávají i po odpojení od napájecího zdroje.

4.2 Rozpoznání tlačítek klávesnice

Rozpoznávání tlačítek klávesnice vychází z její konstrukce. Buď je zjišťována velikost napětí na děliči napětí (u tlačítek TL1-TL7), nebo je zjišťováno, zda-li na vstupu (C.6) je log. 0 nebo log. 1.

```
3 klavesnice:
4 readadc C.7,b0 ;Změří velikost napětí na vstupu z klávesnice
5 ;a odpovídající číslo uloží do paměti RAM, na adresu b0.
6 if b0<42 and b0>22 then down ;tlačítko dolu
7 if b0<71 and b0>51 then value ;tlačítko value
8 if b0<90 and b0>70 then save ;tlačítko ulžit
9 if b0<110 and b0>90 then enter ;tlačítko enter
10 if b0<162 and b0>142 then up ;tlačítko nahoru
11 if b0<182 and b0>162 then settl ;tlačítko nastavení
12 if b0<233 and b0>213 then F1 ;tlačítko F1
13 if pinC.6 = 1 then back ;tlačítko zpět
14 goto klavesnice ;skok na řádek v programu označený klávesnice
```

Př.4.2.1: Ukázka cyklu určeného k detekci stisknutého tlačítka.

4.3 Inicializace LCD

Protože jako zobrazovací jednotku používám znakový LCD displej, je jedním z prvních kroků po spuštění mikrokontroléru inicializace LCD displeje. Inicializace je nutná k nastavení základního ovládání displeje, tedy například použijeme-li 4-bitovou nebo 8-bitovou komunikaci s LCD a podobně. Pokud bychom inicializaci neprovedli, či ji provedli špatně, na LCD displeji se zobrazí znaky ■ v celé první řádce.

V případě mnou použitého LCD displeje jsem zvolil 4-bitovou komunikaci. Rozdíl mezi 8-bitovou a 4-bitovou komunikací je následující. Při 8-bitové komunikaci je pomocí osmi datových linek odeslán celý byte najednou. Ale při 4-bitové komunikaci přes 4 datové linky, je nejprve odeslána horní polovina bytu a poté dolní polovina bytu. 4-bitová komunikace je tedy přibližně dvakrát pomalejší. Při inicializaci dochází k nastavení nejen typu komunikace, ale například i k nastavení počtu řádků displeje nebo velikosti znaků.

```
15 ;inicializace
16 pause 20 ;mikrokontrolér počká 20ms
17 pinsC = %00000011 ;připraví data pro inicializaci
18 pulsout E,1 ;odešle data
19 pause 20
20 pinsC = %00000011
21 pulsout E,1
22 pause 1
23 pinsC = %00000011
24 pulsout E,1
25 pause 1
26 pinsC = %00000010 ;nastaví 4-bitovou komunikaci
27 pulsout E,1
28 pause 20
29 pinsC = %00000010
30 pulsout E,1
31 pause 1
32 pinsC = %00001100 ;4-bitová komunikace, dvouřadé LCD, znaky 5x10
33 pulsout E,1
34 pause 1
35
36 pinsC = %00000000
37 pulsout E,1
38 pause 1
39 pinsC = %00001100 ;zapne displej, kurzor vypnut
40 pulsout E,1
41 pause 1
42
43 pinsC = %00000000
44 pulsout E,1
45 pause 1
46 pinsC = %00000001 ;vymaže displej
47 pulsout E,1
48 pause 20
49 pinsC = %00000000
50 pulsout E,1
51 pause 1
52 pinsC = %00000110 ;nastaví posuv kurzoru vpravo
53 pulsout E,1
54 pause 1 ;konec inicializace
55
```

Př.4.3.1: Inicializace řádkového LCD displeje. (Typ použitého LCD displeje je GDM2002D.)

4.4 Instrukce řadiče LCD

Jak inicializace, tak i následná komunikace probíhá pomocí instrukcí z tzv. Instrukční sady. Instrukce můžeme rozdělit na dvě skupiny. Do první skupiny by patřily instrukce, kdy na pinu RS je log. 0, řadič LCD provádí nějaký příkaz. Do druhé skupiny by pak patřilo zapisování dat do CGRAM¹⁸ nebo DDRAM¹⁹ paměti řadiče, kdy na pin RS přivedeme log. 1.

Instrukce	RS	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
smaže displej, přesune kurzor na začátek	0	0	0	0	0	0	0	0	1
přesune kurzor na začátek	0	0	0	0	0	0	0	1	-
směr posuvu kurzoru, posuv textu	0	0	0	0	0	0	1	I/D	S
zapnutí displeje, zapnutí kurzoru, nastavení kurzoru	0	0	0	0	0	1	D	C	B
posun kurzoru nebo textu	0	0	0	0	1	S/C	R/L	-	-
inicializace	0	0	0	1	DL	N	F	-	-
nastavení adresy CGRAM pro zápis	0	0	1	Adresa v CGRAM					
nastavení adresy DDRAM pro zápis	0	1	Adresa v DDRAM						
zápis dat do CGRAM nebo DDRAM	1	Data k zápisu							
čtení dat z CGRAM nebo DDRAM	1	Data ke čtení							

Tab.4.4.1: Instrukční sada řadiče znakového LCD displeje. (Tabulka neobsahuje instrukci spojenou s pinem R/W, protože jej nepoužívám.)

I/D – 0-posun vlevo, 1-posun vpravo	S/C – 0-posune kurzor, 1-posune text
S – posun textu 0-ne, 1-ano	R/L – 0-směr posuvu vlevo, 1-směr posuvu vpravo
D – 1-zapne displej	DL – 0-4-bitová, 1-8-bitová komunikace
C – 1-zapne kurzor	N – 0-jednořádkový displej, 1-dvouřádkový displej
B – zapne blikání kurzoru	F – 0-znak tvoří 5x8 bodů, 1-znak tvoří 5x10 bodů

Tab.4.4.2: Vysvětlivky k některým bitům z Tabulky 4.4.1.

¹⁸ CGRAM je paměť RAM řadiče, do níž se ukládají nově definované znaky.

¹⁹ DDRAM je paměť RAM řadiče, kde je uložen obsah displeje.

5. Pecní těleso

Pecní těleso je část pece, obsahující muflí, topnou spirálu, termočlánek se zesilovačem, izolaci, plechový obal a víko pece.

5.1 Topná spirála

Jelikož jsem se rozhodl pro stavbu pece s odporovým ohřevem, musel jsem vhodně určit parametry topné spirály. Jako materiál pro topnou spirálu jsem zvolil kanthal, což je slitina železa s chromem a hliníkem. Složení kanthalu který jsem použil je přibližně: Fe-73%, Cr-22%, Al-5%. Pro tuto slitinu jsem se rozhodl zejména kvůli její vysoké maximální pracovní teplotě, to jest teplotě, na níž lze topný drát opakovaně ohřívat. U mnou použitého topného drátu, je tato teplota přibližně 1200°C. Existují ale samozřejmě i jiné typy kanthalových topných drátů, které vydrží teploty až 1900°C.

Dimenzování topné spirály

Vnitřní prostor muflie by měl mít objem do 3,5dm³. Objem vnitřního prostoru muflie byl zvolen tak, aby byl menší než 5l. Protože v praxi bylo ověřeno, že objem 5l je maximální objem, ve kterém lze udržet dostatečnou homogenitu tepelného pole bez nucené cirkulace vzduchu. Vnitřnímu objemu muflie 3,5dm³ odpovídá příkon přibližně 1,5kW²⁰. Je tedy třeba spočítat, kolik metrů a jakého odporového drátu bude potřeba použít, aby příkon byl 1,5kW.

$$\text{Příkon topné spirály: } P = U_{ef} \cdot I_{ef} = \frac{U_m \cdot I_m}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{2}} = \frac{U_m^2}{2R}$$

kde R je odpor topné spirály. To, že topná spirála bude mít i charakter cívky zanedbávám, protože tento výpočet slouží spíše jako odhad a fázový posun způsobený cívkovým charakterem topné spirály bude velmi malý.

$$\text{Odpor topné spirály: } R = l \cdot R_p$$

kde R_p je odpor kanthalového drátu²¹ o daném průměru na 1m a l je minimální délka kanthalového drátu, aby příkon nepřesáhl 1,5kW. Pokud odpor topné spirály dosadíme

$$\text{do vzorce pro výpočet příkonu a vyjádříme l, získáme: } l = \frac{U_m^2}{2P \cdot R_p}$$

Podle tohoto vztahu vypočítáme potřebnou délku kanthalového drátu o průměru například 0,5mm. (P=1500W, $U_m = 230\text{V}$, $R_p = 6,976\Omega/\text{m}$)

$$l = \frac{U_m^2}{2P \cdot R_p} = \frac{230^2}{2 \cdot 1500 \cdot 6,976} = 2,528 \text{ m}$$

Tímto způsobem jsem spočítal potřebné délky kanthalových drátů o nejpoužívanějších průřezech.

20 Hodnota příkonu byla získána ze statistického vyhodnocení poměrů příkonů na vnitřních objemů, již vyráběných tavicích pecí.

21 Hodnoty R_p jsou převzaty od výrobce kanthalového drátu.

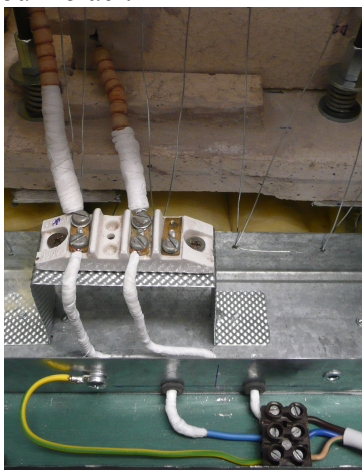
Průměr topného drátu	0,5mm	0,8mm	1,2mm	1,5mm	2mm
R_p	6,98Ω/m	2,8Ω/m	1,28Ω/m	0,82Ω/m	0,46Ω/m
Potřebná délka na spirálu	2,53m	6,3m	13,78m	21,5m	38,33m

Tab.5.1.1: Tabulka kanthalových drátů a jejich minimální délky pro výrobu topné spirály.

Z tabulky 5.1.1 vychází nejvýhodnější parametry pro kanthalový drát o průměru 0,8mm. Protože životnost drátu v peci roste s jeho průměrem, je výhodné zvolit drát co nejtlustší. Avšak u tlustších drátů než 0,8mm vychází minimální potřebná délka drátu příliš velká. Při výrobě topné spirály jsem tedy použil kanthalový drát o průměru 0,8mm.

5.2 Napájení pece

Pec je napájena z řídicí jednotky pulzně dávkovaným síťovým napětím. Napájecí napětí je přivedeno na svorkovnici v technickém prostoru pece. (Technický prostor pece je od zbytku pece oddělen izolací a plechovou stěnou.) Ochranný vodič je ze svorkovnice přiveden na kostru pece. Střední a fázový vodič je přiveden na porcelánovou svorkovnici, na níž je připojen kanthalový topný drát. Kanthalový drát je mezi porcelánovou svorkovnicí a vstupem do mufle zdvojený, aby se méně zahříval. Části drátů přiléhající k porcelánové svorkovnici jsou opatřeny tepelnou izolací.

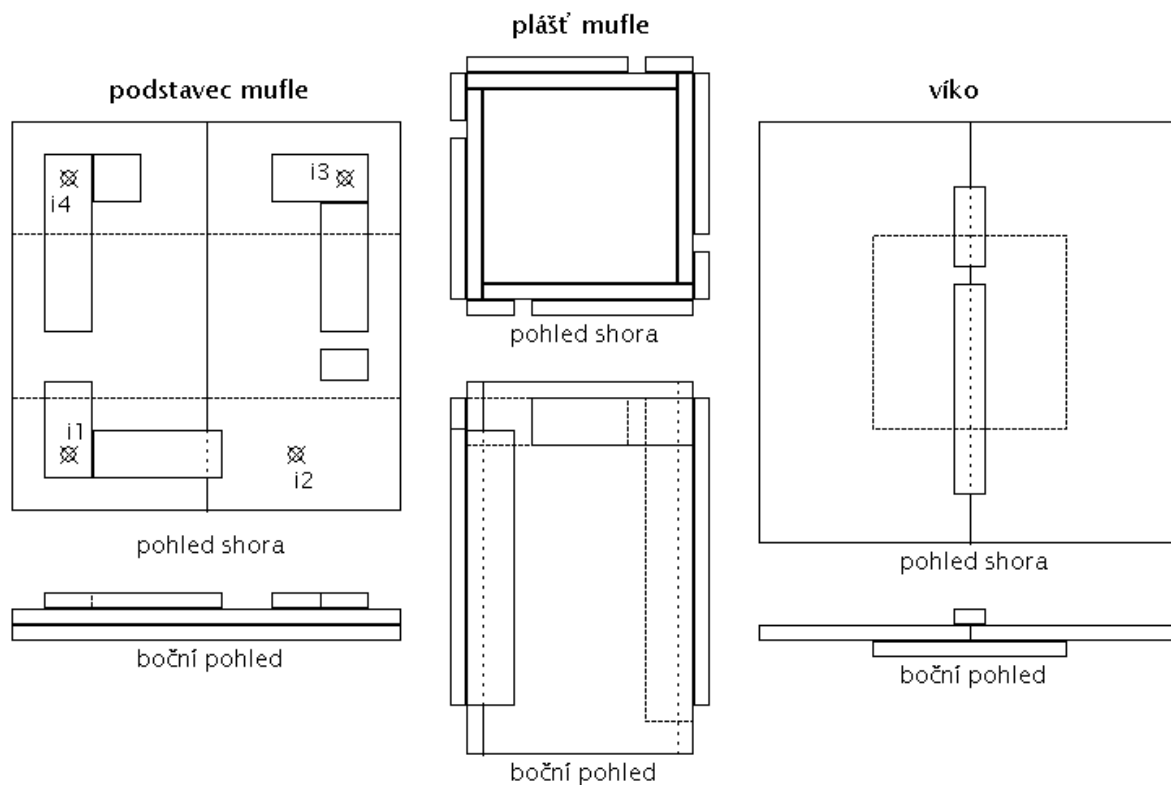


Obr.5.2.1: Přívod napájení mufle.

5.3 Mufle a šamotové součásti

Materiálem, který se používá na pecní vyzdívky, je většinou šamot, a to z důvodu vysoké teplotní odolnosti. Proto jsem při výrobě mufle a částí pece, které jsou při provozu pece nejvíce zahřívány, použil šamotové plátky. Šamotové plátky jsou v podstatě tenké šamotové cihly. Plátky použité při stavbě pece jsou přibližně 250mm dlouhé, 125mm široké a 12mm tlusté. K pospojování šamotových plátek jsem použil žáruvzdorný tmel, který by měl být vydržet teploty do 1350°C. Což je vzhledem k předpokládanému použití pece dostačující.

Nejvíce tepelně namáhané součásti pece se vyskytují v oblasti topné spirály. Tyto části pece jsou celkem tři: podstavec pro mufli, plášť mufle a víko.



Obr.5.3.1: Náčrt šamotových součástí mufle. (Plášť mufle je vysoký 250mm.)

Tři části pece zobrazené na obr.5.3.1 nejsou vzájemně pevně spojeny²². Vnitřní prostor pece nabyl rozměrů hranolu o výšce 250mm a půdorysu 115x115mm. Podstavec mufle je přišroubován přes díry označené i1-i4. Díra i2 je asymetricky umístěná vzhledem k ostatním díram, a to kvůli termočlánku, který je umístěn v rohu při díře i2. Topná spirála je uložena v drážkách v plášti mufle, kde je uchycena čtyřmi pásy z žáruvzdorného tmelu.

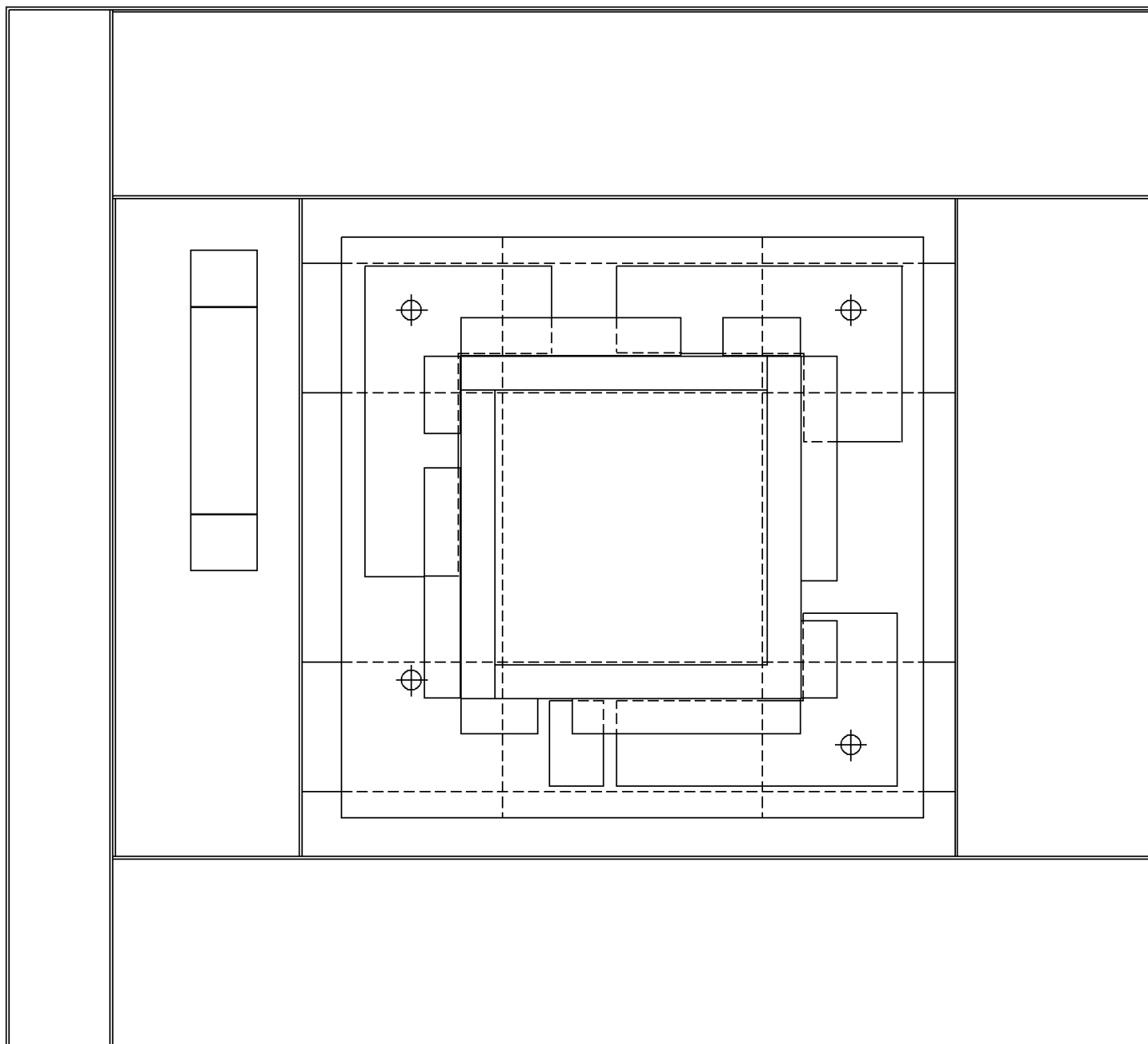


Obr.5.3.2: Fotografie vyrobených šamotových součástí pece.

²² Z důvodu usnadnění výměny topné spirály.

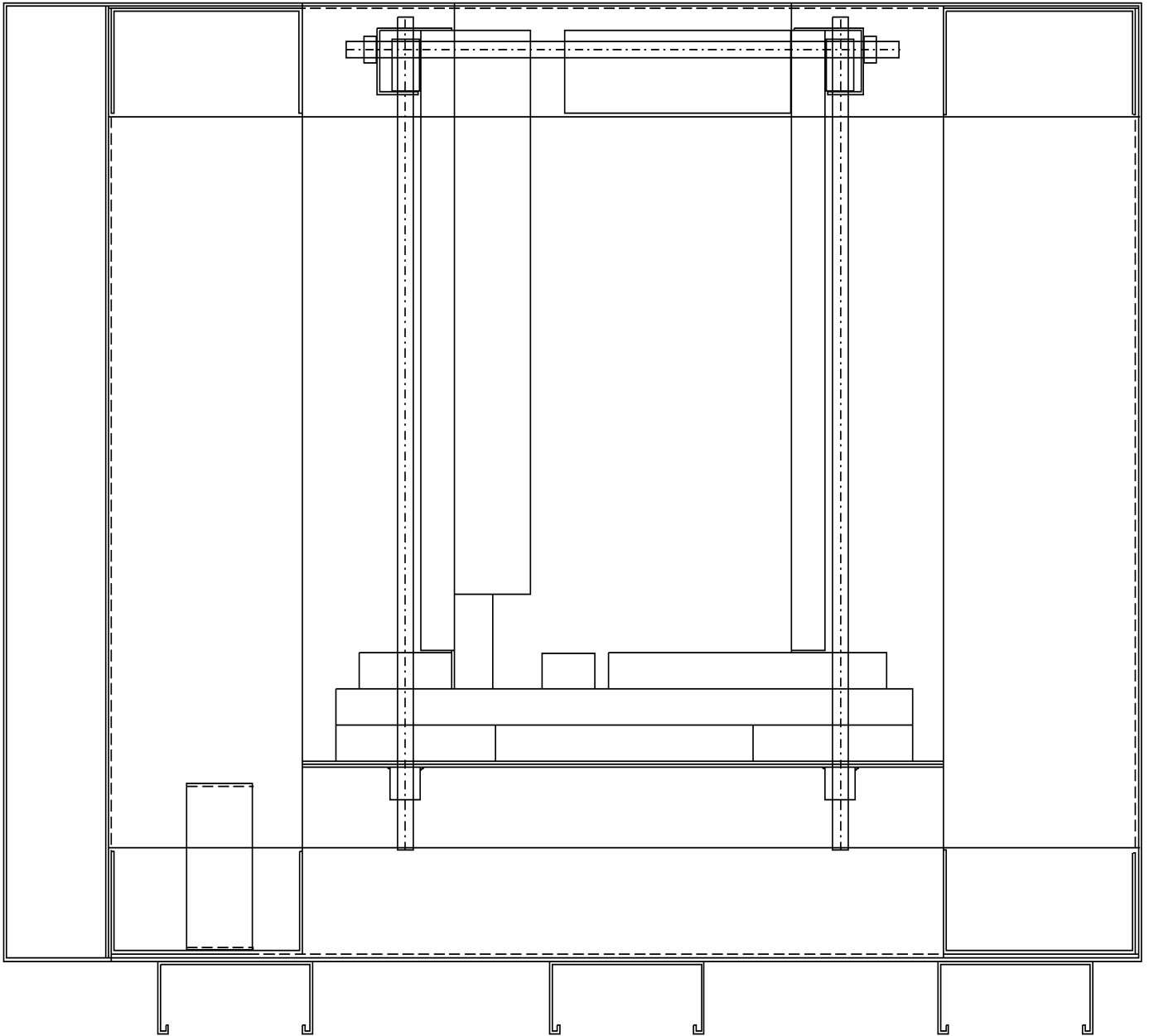
5.4 Plechový obal pece

Obal, ve kterém je mufle a izolace umístěna, je vyroben z plechu o tloušťce 0,8mm. Plechové tabule jsou naohýbány do tzv. psaníček, aby nedocházelo k jejich deformaci. Plechy jsou přinýtovány ke kostře plechového obalu. Kostra plechového obalu je snýtována z profilů typu CD, CW a UW²³. Tyto profily jsou vyrobeny z plechu o tloušťce 0,6mm a jsou pozinkované.

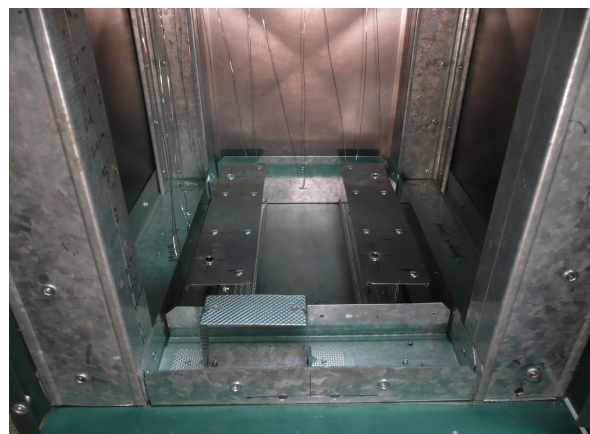
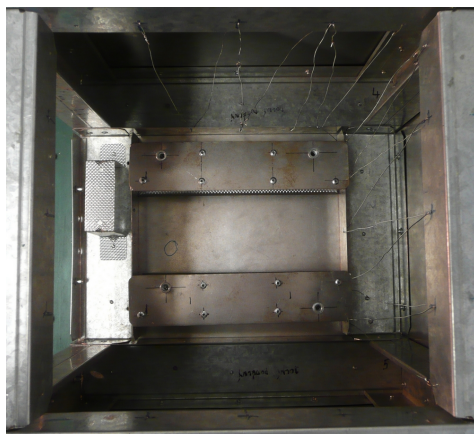


Obr.5.4.1: Půdorys plechového obalu s usazenou muflí.

²³ Jedná se o označení profilů pro práci se sádkartonem.



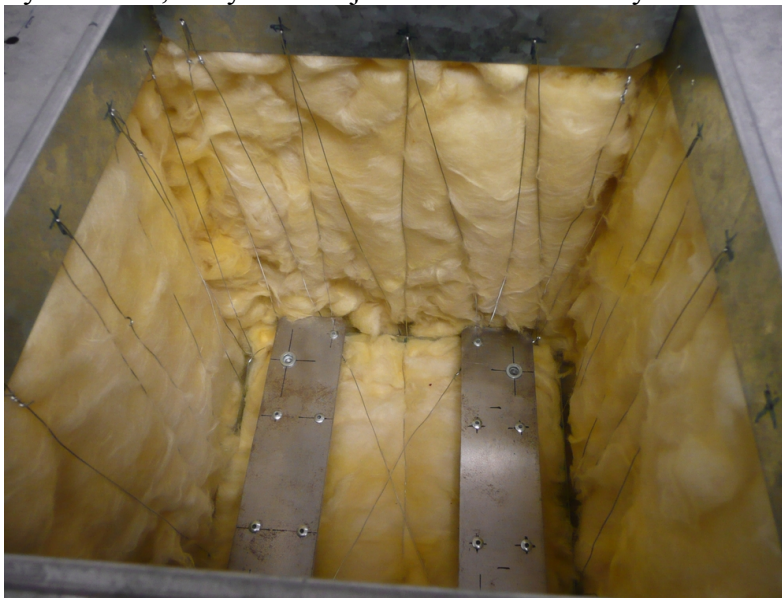
Obr.5.4.2: Bokorys plechového obalu s usazenou muflí.



Obr.5.4.3,5.4.4: Vnitřní prostor plechového obalu.

5.5 Tepelná izolace pece

K tepelné izolaci muflle od zbytku pece byla použita vrstva vzduchu a vrstva skelné vaty. Skelná vata má velmi dobré izolační vlastnosti, přičemž vrstva skelné vaty kolem muflle je přibližně 75mm tlustá. Skelnou vatu odděluje od muflle vrstva vzduchu zvyšující teplotní spád. Skelná vata je z jedné strany ohraničena plechem stěny pece a z druhé strany je uchycena nerezovým drátem, který zabraňuje kontaktu skelné vaty s muflí.



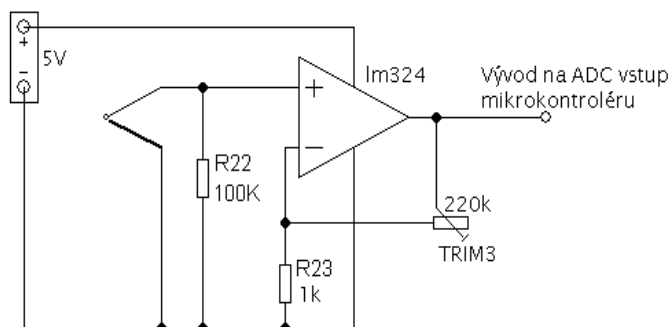
Obr.5.5.1: Pohled shora na tepelnou izolaci pece.

5.6 Měření teploty

K měření teploty v odporové peci, kde předpokládaná teplota bude dosahovat maximálně 1000°C, je třeba využít odpovídající teplotní čidlo. Já jsem jako teplotní čidlo použil termočlánek typu K, který dokáže teplotu měřit s dostatečnou přesností a teploty do 1000°C vydrží.

Termočlánek funguje na principu Peltier-Seebeckova jevu, kdy elektromotorické napětí roste s rozdílem teplot na termočláncu.

Problém u termočlánců je ten, že elektromotorické napětí měřené na termočláncích se pohybuje v řádech setin až jednotek mV. Takovéto hodnoty samozřejmě nelze měřit mikrokontrolérem přímo. Je tedy nutné použít zesilovač napětí. Jako zesilovač napětí jsem použil operační zesilovač lm324. Původně jsem uvažoval o použití dvou operačních zesilovačů v sérii, ale nakonec se z důvodu nižšího rušení ukázalo výhodnější použít jeden.



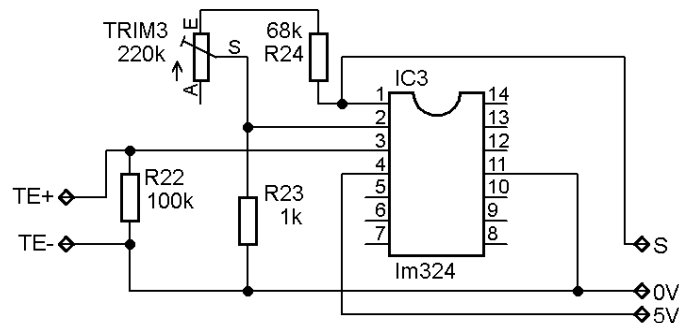
Obr.5.6.1: Schéma zesilovače napětí pro termočlánek.

Realizace zesilovače napětí pro termočlánek

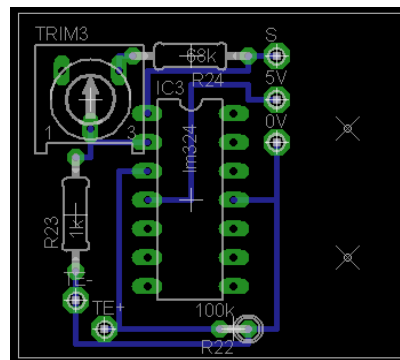
Obvod zesilovače pro termočlánek jsem zrealizoval podle schématu na obr.5.6.1, s tím rozdílem, že jsem přidal rezistor R24. Vývody označené jako TE+ a TE- slouží k připojení termočlátku. Na vývody označené S, 0V a 5V jsem připojil stíněný kabel zakončený konektorem Jack. Tímto kabelem jsem připojil zesilovač k řídicí jednotce pece. Vodič připojený k vývodu označenému písmenem S vede signál ze zesilovače na ADC vstup mikrokontroléru. Rezistor R27 posouvá rozsah možného zesílení, které můžeme vypočítat ze vztahu:

$$A_V = 1 + \frac{R_{R24} + R_{TRIM3}}{R_{R23}}$$

kde A_V je zesílení, R_{R23} a R_{R24} jsou hodnoty rezistorů R23 a R24. R_{TRIM3} je odpor nastavený na trimu 3. Rozsah zesílení pro obvod zesilovače na obr.5.6.2 je: 69-289. Vzhledem k hodnotám napětí, které poskytuje termočlánek je rozsah zesílení pro ADC vstup mikrokontroléru dostatečný.



Obr.5.6.2: Schéma zesilovače napětí pro termočlánek upravené pro výrobu plošného spoje.



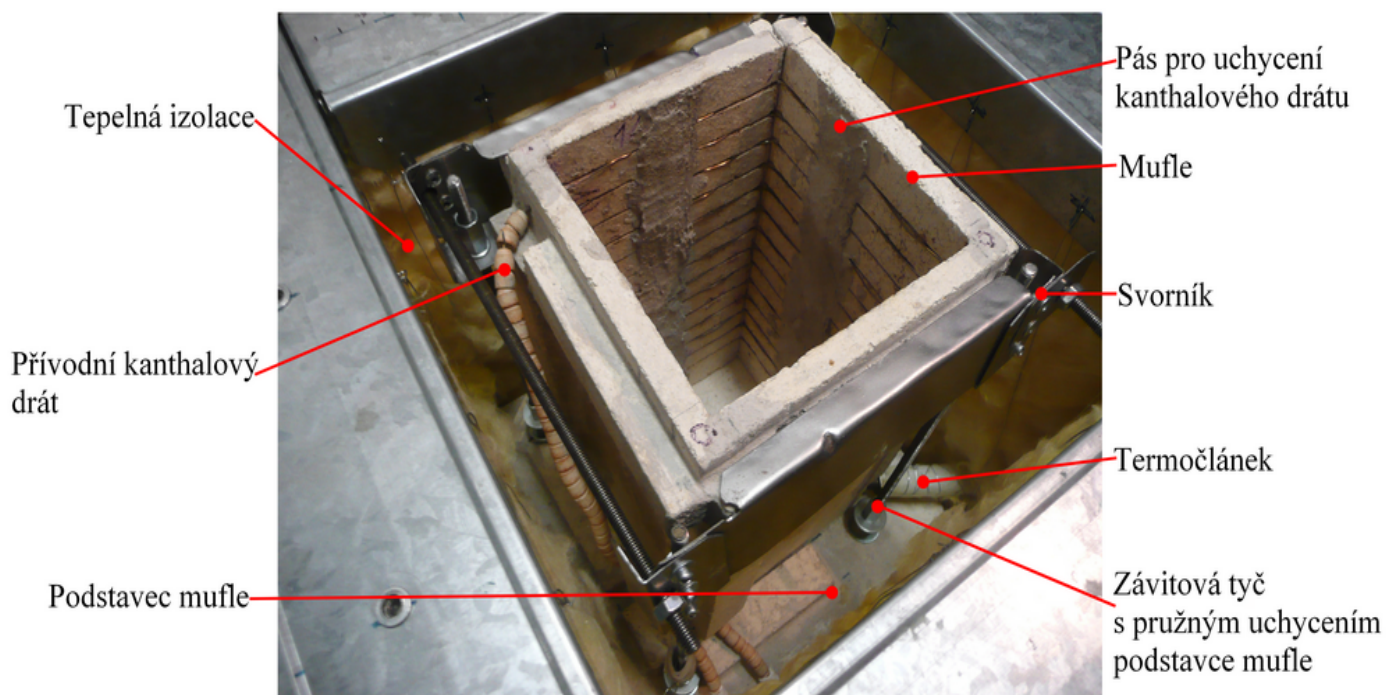
Obr.5.6.3: Plošný spoj zesilovače napětí. (Pohled ze strany součástek.)

5.7 Víko pece

Aby pec umožňovala manipulaci se vsázkou, je opatřena odnímatelným víkem. Víko se podobně jako pec skládá z několika částí. Kostra víka je tvořena čtyřmi profily o šířce 75mm. Kostra je pokryta plechem a uvnitř víka je izolace ze skelné vaty. Část víka, která přímo doléhá na horní okraj mufle, je vyrobena ze šamotu a je upevněna uvnitř víka několika profily.

5.8 Sestavení pecního tělesa

Těleso pece bylo sestaveno následujícím způsobem: nejdříve byl snýtován plechový obal, poté byly nainstalovány přívodní dráty a nakonec byla na nosníky v plechovém obalu usazena mufle s podstavcem a termočlánkem.



Obr.5.8.1: Pohled do vnitřku pece.

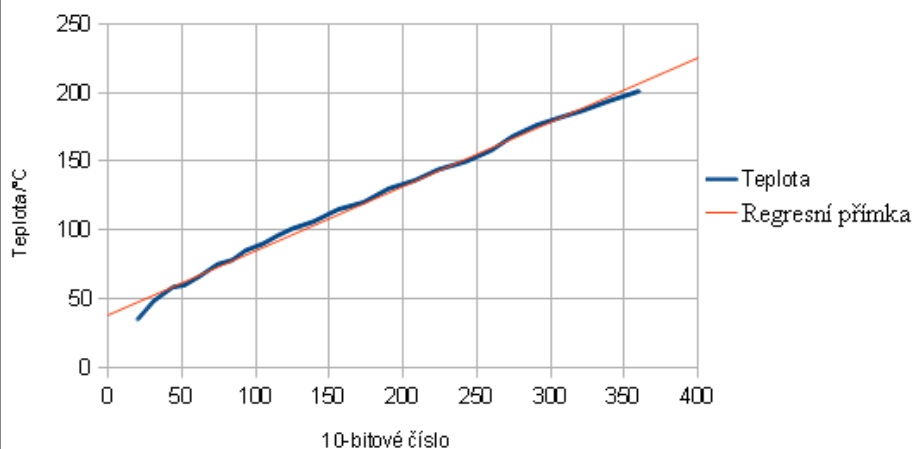
6. Stanovení teploty uvnitř mufle

Při měření teplot uvnitř mufle jsem zjistil, že 10-bitové číslo, které odpovídá velikosti napětí přivedeného na vstup mikrokontroléru ze zesilovače, není rovno teplotě uvnitř mufle. Proto jsem se rozhodl popsat závislost teploty uvnitř mufle na získaném 10-bitovém čísle.

Provedl jsem experiment²⁴, kdy jsem pec postupně ohříval a zároveň jsem bezkontaktně měřil teplotu černého tělesa uvnitř pece. Naměřené hodnoty jsem zanesl do tab.6.1. Z hodnot v tabulce 6.1 jsem pak vytvořil graf na obr.6.1.

č. měření	10-bitové č.	teplota/°C
1.	20	35
2.	31	48,5
3.	44	58,5
4.	52	60
5.	63	67
6.	74	75
7.	84	78
8.	93	85
9.	105	90
10.	115	96
11.	125	101
12.	139	106
13.	156	115
14.	173	120
15.	190	130
16.	208	136
17.	224	144
18.	243	150
19.	260	158
20.	274	168
21.	290	176
22.	310	183
23.	322	187
24.	340	194
25.	360	201

Tab.6.1: Hodnoty získané z měření teploty uvnitř mufle



Obr.6.1: Graf závislosti teploty uvnitř mufle na 10-bitovém čísle.

Abych získal závislost teploty na 10-bitovém čísle, kterou budu moci použít pro naprogramování mikrokontroléru, proložil jsem grafem na obr.6.1 regresní přímku. Rovnice regresní přímky je: $y=0,4676984424x+38,1294075932$. Abych mohl tuto funkci naprogramovat do mikrokontroléru, zaokrouhlil jsem koeficienty v rovnici a zároveň jsem koeficient před x převedl na zlomek: $y=\frac{468}{1000}x+38=\frac{117}{250}x+38$, tuto rovnici jsem pak naprogramoval do mikrokontroléru pro interval 10-bitových čísel <30;500>.

Po této úpravě mikrokontrolér 10-bitové číslo, které přiřadí velikosti napětí na vstupu, dosadí do rovnice odvozené z obr.6.1 a na displej zobrazí výsledek rovnice, který odpovídá teplotě uvnitř mufle.

24 Při experimentu jsem na zesilovači pro termočlánek nastavil vysoké zesílení, pec jsem tedy zkalibroval pro nízké teploty (přibližně do 500°C).

7. Fotografie hotové pece



Obr.7.1: Řídicí jednotka pece



Obr.7.2: Sestavené pecní těleso uzavřené víkem.

8. Závěr

Ve své práci jsem se zabýval stavbou řídicí jednotky a i pece samotné za použití některých neobvyklých principů. Mým cílem nebylo vytvořit pec konkurenceschopnou s průmyslově vyráběnými přístroji, ale ověřit, zda lze některé principy využít při stavbě odporových pecí. Přístroj, který jsem uvedl do chodu, splnil má očekávání.

Odporovou pec se mi podařilo dokončit do stavu, kdy je možné ji ovládat řídicí jednotkou a měřit teplotu uvnitř mufle. Nyní mám v plánu provázat měření teploty uvnitř mufle s regulací příkonu pece, což umožní teplotu a změny teplot v peci nastavit a automaticky regulovat. To si vyžádá instalaci dalších teplotních čidel vně mufle a změnu softwaru.

9. Použitá literatura

- [1] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. Elektronika, součástky a obvody, principy a příklady. 2., rozš. Vyd. Praha: Grada, 2001, 188 s. ISBN 80-716-9884-9.

Použité internetové stránky

- [2] MOC3010M, MOC3011M, MOC3012M, MOC3020M, MOC3021M, MOC3022M, MOC3023M: 6-Pin DIP Random-phase Optoisolators Triac Driver Output (250/400 Volt Peak) [online]. 1.0.2. South Portland: Fairchild Semiconductor Corporation, c 05, 9. 2009 [cit. 2014-01-03]. Dostupné z:
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/002/272/moc3022-datasheet-1.pdf>