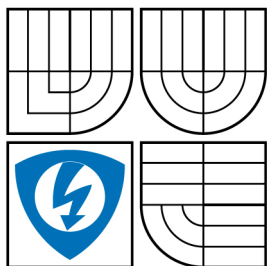


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTRONICKÝ DETEKTOR PRO TENKOVrstvé MIKROSENZORY PLYNŮ

ELECTRONIC DETECTOR FOR THIN-FILM GAS MICROSENSORS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

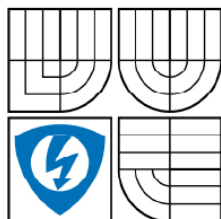
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JAKUB ROZŠTÍPIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Jakub Rozšípíl
Ročník: 2

ID: 89626
Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Elektronický detektor pro tenkovrstvé mikrosenzory plynů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte princip funkce senzorů plynů na bázi polovodivých oxidů kovů. Charakterizujte vlastnosti senzorů plynů pro stanovení parametrů elektronického detektoru a regulátoru teploty. Navrhněte a realizujte tuto elektroniku v podobě přístroje v diskrétní formě v SMT. Přístroj by měl být schopen ovládat 4 senzory a komunikovat s PC pro nastavení počátečních podmínek a čtení odezev senzorů. Práce budou prováděny v Laboratoři mikrosenzorů a nanotechnologií (LabSensNano).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 9.2.2009

Termín odevzdání: 29.5.2009

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Jakub Rozšípíl
Bytem: Zlín, třída Tomáše Bati 2120, 760 01
Narozen/a (datum a místo): 11.4.1984, Zlín

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Elektronický detektor pro tenkovrstvé senzory plynů
Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě – počet exemplářů 2
☒ elektronické formě – počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. 5. 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout a realizovat elektroniku v podobě SMT přístroje pro tenkovrstvé senzory plynů a nastudovat princip funkce senzorů plynů na bázi polovodivých oxidů. Přístroj obsahuje regulátor teploty a elektroniku, jež je schopna snímat koncentraci plynů na povrchu senzoru. Zařízení je navrženo pro řízení 4 senzorů a má komunikovat s počítačem pro nastavení počátečních podmínek a snímání koncentrace plynu. Praktická část diplomové práce obsahuje návrh a realizaci elektroniky a tvorbu softwaru pro její ovládání.

Abstract:

The general aim of Master's thesis is to design and execute electronics in the SMT device view for thin film gas sensors and to study principle of gas sensor functionality based on semiconducting oxides. The SMT device contains temperature controller and electronics which is able to scan the concentration of gas on the sensor surface. It is designed for controlling of four sensors and has to communicate with computer for setting of initial conditions and scanning of concentration of gas. The practical part of Master's thesis contains design and construction of electronics and software making.

Klíčová slova:

Senzor plynů, polovodivé oxidů kovů, mikrosenzor, tenkovrstvý senzor.

Keywords:

Gas sensor, semiconductor metal oxide, microsnsor, thin-film sensor.

Bibliografická citace díla:

ROZŠTÍPIL, J. Elektronický detektor pro tenkovrstvé mikrosenzory plynů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. 5. 2009

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jaromíru Hubálkovi, Ph.D. za metodické vedení a cenné rady při plnění a řešení úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci.

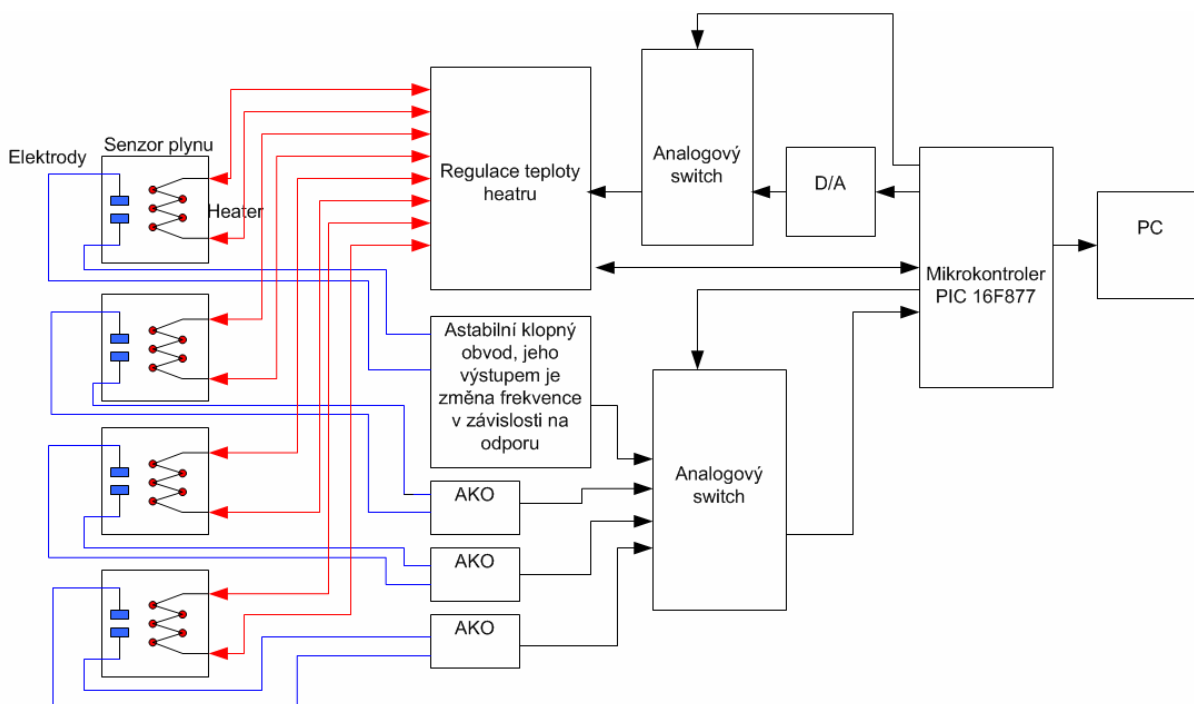
OBSAH

OBSAH.....	7
1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	9
2 SENZOR	11
2.1 SENZORY DOSTUPNÉ SE NA TRHU.....	11
2.2 ROZDĚLENÍ CHEMICKÝCH SENZORŮ BIOSENZORŮ PLYNŮ:	12
2.3 TENKOVSTVÉ SENZORY	13
2.4 POUŽITÝ SENZOR	13
2.5 TYP SENZORU.....	15
3 OBVODOVÉ BLOKY	17
3.1 MĚŘENÍ KONCENTRACE PLYNU	17
3.2 VYTÁPĚNÍ SENZORU	17
3.3 PŘEPÍNÁNÍ SENZORŮ	18
3.4 KOMUNIKACE S POČÍTAČEM	18
3.5 MIKROKONTROLÉR.....	19
3.5.1 Typ mikrokontroléru.....	21
3.5.2 Microchip PIC16F877	21
3.5.3 Popis mikrokontroléru PIC16F877.....	23
3.5.4 Organizace paměti	32
3.5.5 Organizace paměti programu	32
3.5.6 Organizace paměti dat	32
3.6 D/A PŘEVODNÍK.....	33
3.6.1 Komunikace přes I ² C.....	34
3.7 KOMUNIKACE S PC	35
3.7.1 USB.....	35
3.7.2 FTDI232RL	35
3.8 POUŽITÝ SOFTWARE.....	37
3.8.1 MPLAB	37
3.9 OBVODOVÉ ČÁSTI PRO ZAŘÍZENÍ.....	38
3.9.1 Symetrický zdroj napětí	38
3.9.2 Rozdílový zesilovač s velkým vstupním odporem.....	39
3.9.3 Astabilní klopný obvod.....	40
3.9.4 Analogový přepínač 4066D	42
3.9.5 Zapojení mikrokontroléru.....	43
3.10 VÝBĚR SOUČÁSTEK PRO TESTOVACÍ DPS	44
3.11 VÝBĚR SOUČÁSTEK PRO FINÁLNÍ DPS	45
4 PRAKTICKÁ ČÁST PRÁCE	46
4.1 TESTOVACÍ DPS.....	46
4.1.1 Osazení DPS.....	47
4.2 ZDROJ	48
4.3 VÝROBA FINÁLNÍ DPS	49
4.4 OŽIVENÍ FINÁLNÍ DPS.....	49
4.4.1 Oživení astabilního klopného obvodu.....	49
4.4.2 Zprovoznění mikrokontroléru.....	50

4.4.3	<i>Zprovoznění obvodu FTDI232 RL</i>	<i>51</i>
4.4.4	<i>Zprovoznění zdroje symetrického napětí.....</i>	<i>52</i>
4.5	ALGORITMUS	52
4.6	MĚŘENÍ NA SENZORU	55
5	ZÁVĚR	56
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	57

1 Úvod do problematiky

Hlavním úkolem této práce je zrealizovat elektronické řízení pro senzory plynů, přičemž na jednom čipu jsou vytvořeny čtyři senzory. Obvod má být vytvořen SMT technologií. Úkolem bylo pro tyto senzory zrealizovat obvod, který bude napájen ze sítě (230 V). Obvod by měl komunikovat s počítačem (posílat po sériové lince data o naměřených koncentracích plynů). Měl by být řízen mikrokontrolérem, který bude částečně zajišťovat regulaci topného elementu (heater) senzoru, snímat jeho teplotu a velikost koncentrace plynů. Celý takto zhotovený obvod bude v jednom celku, kromě senzorů, které jsou připojeny na konektor a budou vyvedeny mimo obvod.



Obr. 2.1: Blokové schéma elektronického řízení pro jeden senzor plynů

Samotný obvod se bude skládat z několika funkčních bloků jak lze vidět na obr.2.1. Chemický senzor, který měří koncentraci plynu je vyhříván topným tělesem na teplotu, při které má největší citlivost (teplota od 150°C do 600°C, podle druhu senzoru). Při této teplotě je rozsah odporů na elektrodách stovky Ω až stovky $k\Omega$. Při pokojové teplotě může být odpor na elektrodách několik $M\Omega$. Regulace teploty topného tělíska je prováděna zpětnou vazbou z mikrokontroléru a regulačním obvodem, skládající se z diferenčního zesilovače, kterým nastavujeme teplotu a diferenčního zesilovače, kterým se teplota (změna odporu) snímá. Teplota mění odpor topného elementu tak, že se zvyšující se teplotou klesá odpor a naopak pokud teplota klesá odpor se zvyšuje. Měření teploty je realizováno tak, že je snímán úbytek napětí na topném tělese, který porovná diferenční zesilovač. Jeho výstup je přiveden na port

mikrokontroléru, kde je napětí převedeno na teplotu, zároveň je tento výstup připojen na neinvertující vstup operačního zesilovače. Jeho druhý vstup (invertující) je připojen na port mikrokontroléru.

Měření koncentrace plynu je výhodnější střídavou (AC) metodou, kvůli polarizaci plynu na povrchu senzoru. Z tohoto důvodu je v obvodu zdroj symetrického napájení, který má výstupní napětí + 5 V, - 5 V, 0 V. Samotný obvod k měření koncentrace plynů je generátor pravoúhlých kmitů realizován tak, že jsou do zpětné vazby klopného obvodu obsahující operační zesilovač a RC článek připojeny elektrody senzoru. Změnou koncentrace plynu, se změní odpor. Změnou odporu se změní frekvence signálu na výstupu klopného obvodu. Tento signál má konstantní amplitudu, mění se pouze frekvence. Aby bylo možné signál číst vstupem vnějšího přerušení mikrokontroléru, je nutné ho usměrnit. Použita je zde dioda, která je zapojena jako jednocestný usměrňovač, výstup diody je připojen na bázi tranzistorového spínače, kvůli udržení úrovně TTL pro celé měřené frekvenční pásmo. Na portu mikrokontroléru je tedy usměrněný signál s TTL úrovní a má kladnou polaritu. Počtu impulsů na vstupním portu mikrokontroléru bude úměrná velikost odporu ve zpětné vazbě generátoru pravoúhlých kmitů, tím i koncentrace plynu na povrchu elektrody. Je potřeba snímat impulsy z každého senzoru zvlášť, proto je v obvodu použit oboustranný analogový přepínač, kterým se po určité časové době pomocí mikrokontroléru přepínají jednotlivé výstupy ze senzorů a mikrokontrolér je čítá. Přepínání je zabezpečeno pomocí výstupů z mikrokontroléru.

Jak už bylo řečeno výše na jednom čipu jsou 4 senzory, proto musel být vytvořen obvod, pro řízení každého senzoru plynů. Pro vytápění každého topného elementu zvlášť je zde použit obvod, který obsahuje diferenční zesilovač a měří se úbytek odporu na vytápěcím elementu. Tato změna napětí se přivede na vstup A/D převodníku mikrokontroléru z každého senzoru zvlášť. Pro řízení vytápění je použit externí D/A převodník, který je řízen mikrokontrolérem. Na výstupu převodníku je další analogový přepínač. Jeho vstupy jsou přivedeny na výstupy mikrokontroléru a přepínání je jím řízeno. Na každém výstupu elektronického přepínače je analogová paměť k udržení napěťové úrovně na vstupu regulátoru vytápění topného elementu.

2 Senzor

2.1 Senzory dostupné se na trhu

Běžně dostupné senzory jsou vyráběny v různých konstrukčních variantách. Liší se uspořádáním elektrod, tloušťkou vrstev, použitých materiálech, tvarem, použitím různých katalyzátorů. Nejrozšířenější uspořádání senzoru je v současné době planární, používá se kvůli kompatibilitě s elektronickými systémy. Většinou je nosičem substrát z korundové keramiky. Na vrchní straně jsou elektrody z platiny, na nichž je nanесena aktivní (detekční) vrstva. Na spodní straně je topný element, většinou platinový [15].

Mezi nejvýznamnější výrobce senzorů plynů patří:

- Figaro Engineering Inc.

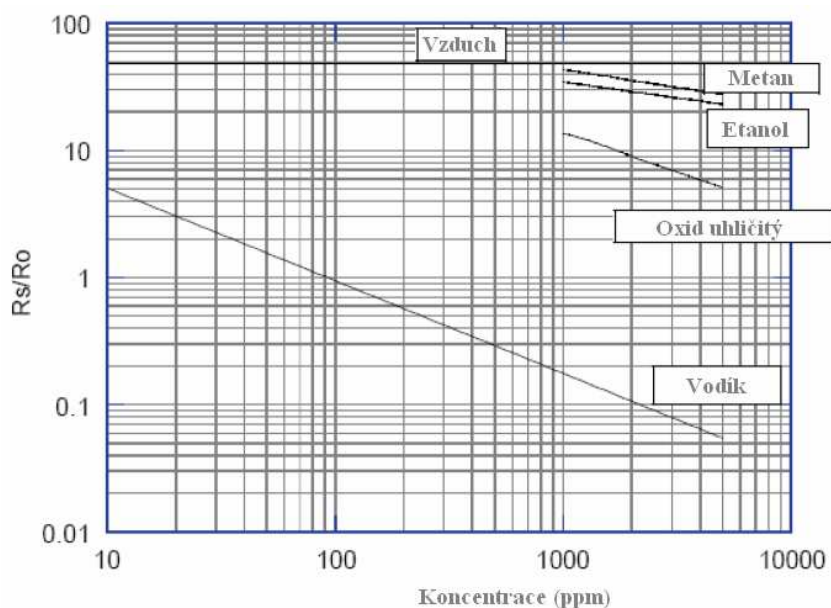
TGS (Taguchi Gas Sensor) – senzory pro bezpečnostní systémy, řídicí systémy. Používají se při dechových zkouškách pro zjištění hladiny alkoholu v krvi. Dále mohou měřit výbušné a toxické plyny.



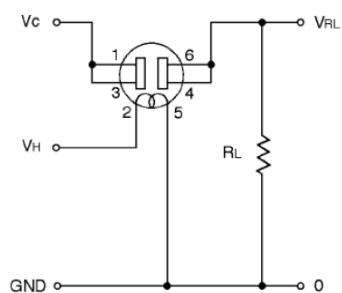
Obr. 2.1.: Senzory dostupné na trhu

Senzor TGS 821 je určen k detekci vodíku ve vzduchové atmosféře. Je pro koncentrace 50 až 1000 ppm. Odezvu senzoru na různé koncentrace plynu popisuje tzv. citlivostní charakteristika (1) [15]. Výrobce definuje citlivost jako poměr elektrických odporů R_s/R_o , kde R_s je odpor senzoru (resp. aktivní vrstvy) v atmosféře obsahující plyn o dané koncentraci (vodorovná osa grafu), R_o je referenční hodnota - odpor senzoru v atmosféře obsahující 100 ppm vodíku [15]. Citlivostní charakteristika je na obr. 2.2, zapojení senzoru obr. 2.3.

$$R_S = \left(\frac{V_C}{V_{RL}} - 1 \right) \cdot R_L \quad (1)$$



Obr. 2.2.: Citlivostní charakteristika senzoru



Obr. 2.3.: Zapojení senzoru TGS 821

2.2 Rozdělení chemických senzorů biosenzorů plynů:

Anorganické senzory (nejpočetnější skupina senzorů), organické senzory (ve vývoji), biosenzory (rozvoj v nejbližší budoucnosti) [8].

Anorganické senzory se dále dělí na: polovodičové oxidové senzory, kontaktní potenciometrické, senzory na principu Seebeckova jevu, piezoelektrické, vláknové, pyroelektrické, elektrochemické, kapacitní, ISFET, CHEMFET, optoelektrické, bipolární tranzistory, schottkyho diody [8].

Senzory se změnou vodivosti:

Rozdělení podle uspořádání:

Plošné: tenkovrstvé (tloušťka vrstvy cca 0,3 μ m), tlustovrstvé (průměr zrn materiálu cca 0,5 μ m) [8].

2.3 Tenkovrstvé senzory

Jedná se o senzory s vysokou citlivostí, jednoduchostí konstrukce. Možnost miniaturizace na čipu, nízká cena. Jednoduchá technologie a možnost slučitelnosti s integrovanými obvody [8]. Nedostatkem tohoto typu senzoru je malá dlouhodobá stabilita. Tenkovrstvé senzory obsahují: funkční citlivou strukturu, kontaktní strukturu, systém pro měření teploty a vyhřívací systém [8].

2.4 Použitý senzor

Jedná se o chemický vodivostní senzor na bázi polovodiivých kovů. Využívá se změny vodivosti a povrchového potenciálu. Mění se vlastnosti na závislosti koncentrace plynů. „Proces detekce molekul zahrnuje řadu postupných reakčních kroků: fyzikální adsorpci, chemisorpci, povrchové reakce, reakce katalyzované deponovaným kovem, reakce na rozhraní zrn, difúzi reaktantů do nosného materiálu aktivní vrstvy, reakce v objemu nosného materiálu, difúzi a desorpci produktů“ [9]. Senzor využívá schopnosti změny vodivosti polovodiče důsledkem přítomností redukční nebo oxidační složky v atmosféře [9]. Citlivá část senzoru (snímací část) z polovodičového materiálu je ve formě polovodivé vrstvy, která je nanášena na nevodivém materiálu. Nejčastěji používané polovodivé vrstvy jsou: SnO₂, In₂O₃, ZnO [9]. Tyto oxidy obvykle nemohou oxidovat a tím pádem nemění své elektrické vlastnosti. Změna vodivosti se mění tím, že dochází ke kontaktu plynu s polovodičem. Vodivost je větší u N typu polovodiče, když je koncentrace a reaktivita redukčního plynu vyšší [9]. Pokud se koncentrace redukčního plynu zmenší, sníží se také vodivost senzoru. Pro měření odporu senzoru (polovodiče) se určuje velikost koncentrace oxidačně redukčního plynu [9]. Aby senzor správně pracoval, tak obsahuje ještě topný element. Celý senzor se tedy sestává z topného elementu, elektrod a polovodivé vrstvy pro snímání koncentrace plynů. Topný element je vytápěn na provozní teplotu maximálně až 480°C. Senzor je vytápěn, protože to usnadňuje „překonávání aktivační energie chemických reakcí, které na povrchu senzoru probíhají“ [9].

Mezi základní parametry senzoru patří citlivost na detekovaný plyn.

Pro oxidační plyny je citlivost definována:

$$S(t_m, c_i) = \frac{R_{\text{plyn}}(t_m, c_i)}{R_{\text{vzd}}(t_m)} \quad (2)$$

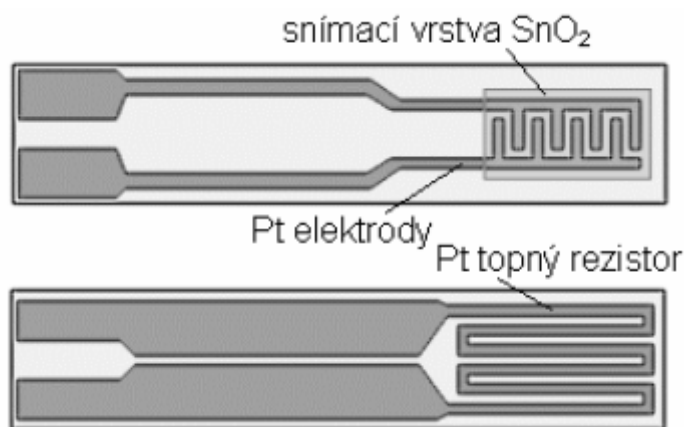
pro redukční plyny je citlivost:

$$S(t_m, c_i) = \frac{R_{\text{vzd}}(t_m)}{R_{\text{plyn}}(t_m, c_i)} \quad (3)$$

t_m je teplota senzoru, c_i je koncentrace detekovaného plynu, R_{plyn} je odpor aktivní polovodičové vrstvy (Ω). R_{vzd} je odpor aktivní vrstvy bez měřeného plynu.

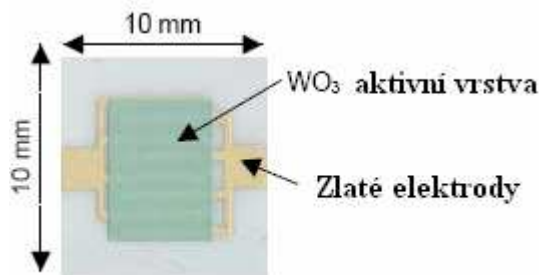
Když je senzor vystaven příslušnému plynu (např. CO), volné kyslíkové vazby na povrchu jsou spotřebovány adsorpcí plynu a sníží se elektrický odpor [1], tím pádem i proud, který protéká rezistorem. Senzor je vyhříván a změnou koncentrace plynu se mění odpor senzoru. Odpor se mění řádově od 100 Ω až po 100 k Ω . Kvůli možné polarizaci elektrod je nutno měřit úbytek napětí impulsním napětím se střední hodnotou 0. Toto napětí se pak upraví na úroveň, s kterou může pracovat mikrokontrolér.

Základní ukázka designu chemického senzoru představuje obrázek 2.4. Pro detekci plynů je opatřen elektrochemickým převodníkem plynů (elektrody s citlivou vrstvou) a topným elementem. V TLV technologii je velká nevýhoda čistota natisknuté kovové vrstvy, protože pasta obsahuje vazební složky (skelná frita) pro zajištění adheze. Vypálené vrstvy jsou také velmi drsné i porézní, což na jednu stranu zvyšuje plochu elektrod, ale na druhou geometrická plocha neodpovídá skutečné a musí být určena experimentálně [1].

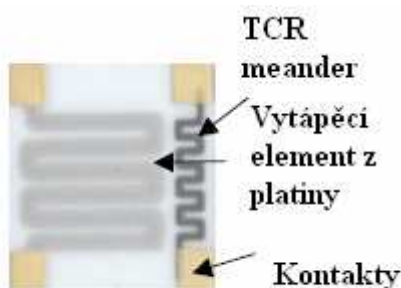


Obr. 2.4.: Tlustovrstvý senzor na bázi SiO₂

2.5 Typ senzoru



Obr. 2.5: Senzor plynů – horní strana s elektrodami a převodníkem



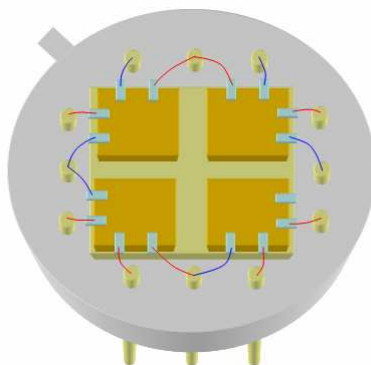
Obr.2.6: Spodní strana s ohřívacím elementem a TCR čidlem

Příklad senzoru plynů využívající měření vodivosti představuje obrázek 2.5 a 2.6, který obsahuje potisk z obou stran. Z jedné strany elektrody s převodníkem tvořeným oxidy polovodivých kovů (např. SnO_2 , TiO_2 , WO_3 apod.), tj. aktivní vrstva citlivá na plyny. Nejvyšší citlivost změny vodivosti těchto oxidů je při určité teplotě, což závisí na plynu a bývá od 150 do 600°C. Použitý typ senzoru je mikromechanizovaný, obsahuje tenkou membránu a na ní topný element a elektrody oddělené vrstvou SiO_2 . Pro svoji činnost využívají dvou jevů:

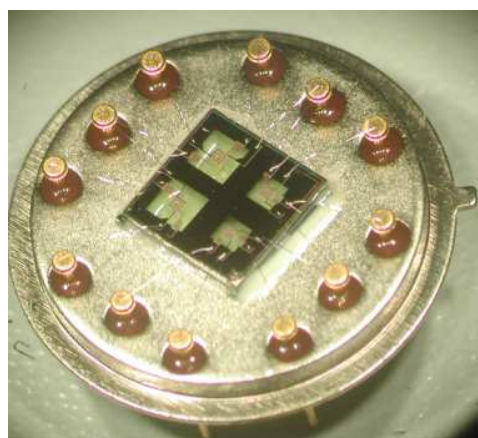
- Když je senzor vystaven příslušnému plynu (např. CO), volné kyslíkové vazby na povrchu jsou spotřebovány adsorpcí plynu a sníží se elektrický odpor.
- Další změny elektrického odporu jsou způsobeny přenosem elektronů mezi adsorbovanými molekulami a polovodičovým povrchem (např. pro detekci NO_2).

Mezi nejpoužívanější chemické senzory patří senzory na bázi SnO_2 . Přítomnost určitého plynu a jeho koncentrace může být určena hodnotou elektrického odporu, resp. Poměrem změny odporu k referenční hodnotě [1].

Na obr.2.8 je zobrazen použitý senzor, kde jsou na křemíkovém substrátu 4 čipy pro různé typy plynů. Pouzdro má 12 vývodů. Červeně jsou zvýrazněny kontakty topného elementu a modře kontakty k elektrodám.



Obr. 2.7: Ilustrační zobrazení použitého senzoru plynů v pouzdře TO-12

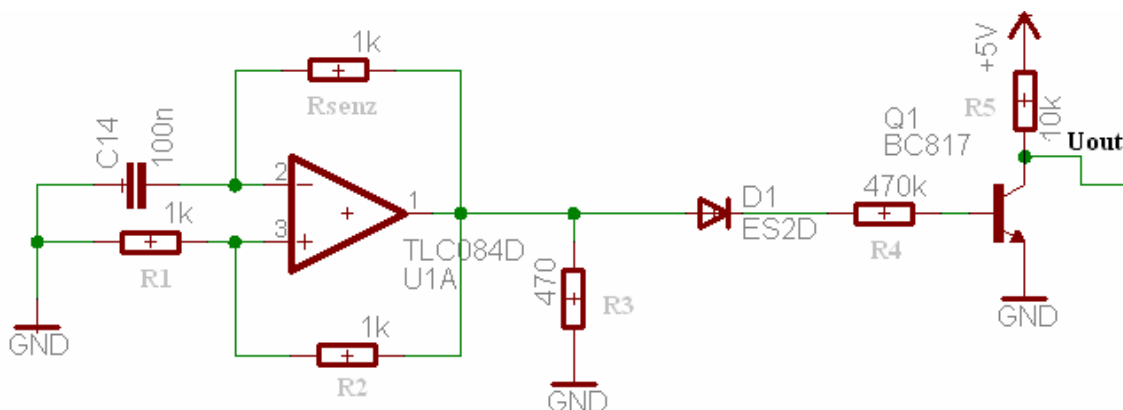


Obr. 2.8: Zobrazení použitého senzoru plynů v pouzdře TO-12

3 Obvodové bloky

3.1 Měření koncentrace plynu

Jak je popsáno výše, je zapotřebí senzor vytápnout, aby byla překonána aktivační energie. Také proto, aby měl senzor co nejvyšší citlivost. Samotné měření se provádí tak, že změnou koncentrace plynu se změní elektrický odpor na povrchu elektrod. Obvod pro měření odporu je napájen střídavým napětím $\pm 2,2\text{V}$. Změnou odporu ve zpětné vazbě stabilního klopného obvodu (dále jen AKO), se změní frekvence na výstupu obvodu. Je důležité, aby pasivní součástky použité v AKO byly co nejpřesnější. Měřením jsem si ověřil, že na výstupu AKO jsou mezera a impuls v poměru 1:1. Signál je potřeba převést na potřebnou úroveň TTL do vstupu mikrokontroléru. Proto je usměrněn diodou a dále přiveden na vstup tranzistorového spínače. Frekvence impulsů se pohybuje od 40 Hz do 1,2 kHz. Na obr 1.1. je schéma použitého obvodu pro měření koncentrace plynu, v kapitole 3.9.3 je popsáno chování obvodu spolu s výpočty.



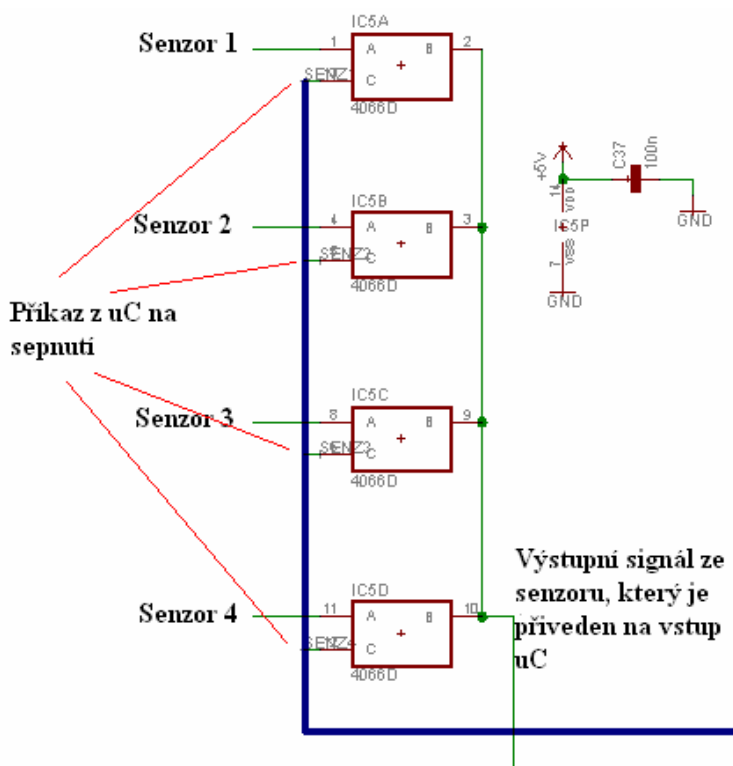
Obr. 3.1: Obvod pro měření koncentrace plynu

3.2 Vytápění senzoru

Každý ze senzorů je vytápěn vlastním topným elementem. Vytápění topného elementu je vytvořeno tak, že je v obvodu připojen PNP bipolární tranzistor, který řídí proud tekoucí topným elementem. Proud je řízen výstupem z diferenčního zesilovače, přes bázevý odpor. Změna teploty vytápěcího elementu vyvolá změnu odporu, tím se změní hodnota napětí na výstupu diferenčního zesilovače, toto napětí se porovná s napětím výstupu D/A převodníku (hodnota napětí je přednastavena programově) v druhém diferenčním zesilovači. Programově bude nastavena teplota (z mikrokontroléru přes D/A převodník), se kterou je porovnává skutečná teplota a tím je proud na výstupu bipolárního tranzistoru větší nebo menší. Schéma obvodu je v příloze diplomové práce obr. 2 a 3.

3.3 Přepínání senzorů

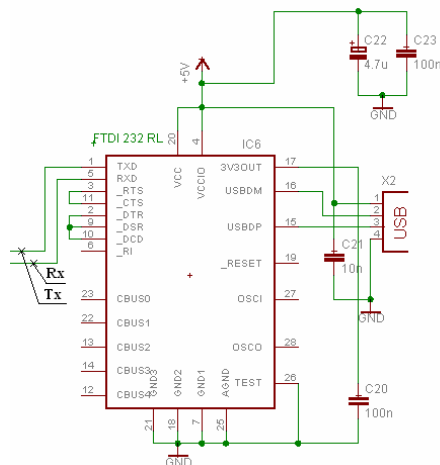
Bylo nutné navrhnout jakým způsobem sbírat data ze senzorů a zároveň je všechny řídit. Řešením by bylo připojit každý výstup senzoru k mikrokontroléru a čítat počet impulzů na každém zvlášť. Tohoto řešení nešlo v praxi dosáhnout, protože je potřeba vstupu vnějšího přerušení a čítače mikrokontroléru, pro každý senzor. Proto bylo zvoleno přepínání mezi jednotlivými senzory analogovým přepínačem řízeným mikropočítačem. Stejným způsobem je navrženo i přepínání řízení vytápění. Schéma analogového přepínače je na obr. 3.2, jeho popis je v kapitole 3.9.4 analogový přepínač.



Obr. 3.2: Obvod pro měření koncentrace plynu

3.4 Komunikace s počítačem

Nějakým způsobem je nutné posílat výsledky koncentrací plynů do počítače. Důležité je najít vhodný mikrokontrolér, který umí komunikovat s vnějšími periferiemi. Komunikace bude probíhat pomocí sériového rozhraní USART a externího převodníku FTDI 232 RL. Na obr. 3.3 je zobrazeno zapojení převodníku pro komunikaci s počítačem přes USB.



Obr. 3.3: Zapojení obvodu FTDI232 RL

3.5 Mikrokontrolér

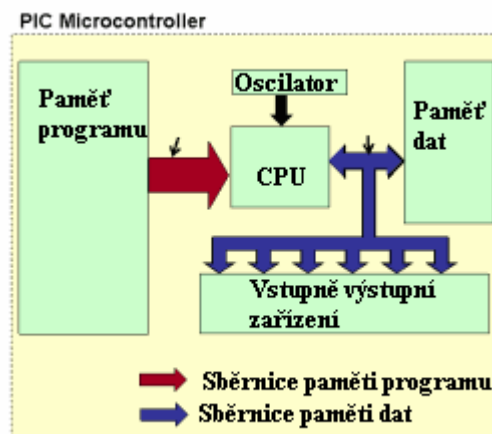
Aby bylo možné řídit vytápění jednotlivých senzorů a zároveň snímat jejich odpor (změnu koncentrace plynu), je třeba použít v zařízení vhodný mikrokontrolér. Možnosti výběru mikrokontrolerů jsou v dnešní době velké. Nejznámější jsou od firem Microchip, Atmel, Motorola. Zvolil jsem mikrokontrolér firmy Microchip, kvůli jeho nízké ceně a dostupnosti programátoru ve škole. Mikrokontroléry microchip se dělí na skupiny: BASE-LINE, MID-RANGE a HIGHT-END. Pro mé zařízení jsem vybral kontrolér střední třídy, tedy MID-RANGE. Momentálně se v moderních aplikacích používají procesory HIGHT-END řady, jedná se hlavně o 32 bitové kontroléry. Rozhodující faktory pro výběr mikrokontroléru u mého zařízení byly:

- počet vstupních a výstupních pinů
- přítomnost AD a DA převodníků
- rozsah AD převodníků
- počet AD vstupních pinů
- komunikace USART, I²C
- počet čítačů
- typ pouzdra

Architektura 8 bitových mikrokontrolérů firmy Microchip:

- instrukce a data jsou posílána na oddělených sběrnicích, z důvodu zvýšení rychlosti a celkového výkonu
- datová sběrnice má šířku 8 bitů

- sběrnice paměti programu má datovou šířku, která je přizpůsobena konkrétnímu použití (typu) kontroleru
- širší sběrnice dovoluje posílat více informací z paměti do CPU, umožňuje v jednom hodinovém cyklu provádět více instrukcí [2]



Obr. 3.4: Architektura 8 bitového mikrokontroléru PIC v jednotlivých blocích

Dělení mikroprocesorů na základní třídy:

BASE-LINE

Zahrnuje procesory typu PIC10, částečně PIC12 a PIC16. 6 až 28 pinová pouzdra. Malé napájecí napětí tuto třídu předurčuje jako ideální řešení pro aplikace napájené z baterií.

Výhody:

- malý počet pinů, tím pádem menší rozměr pouzdra (použití pouze u jednoduchých aplikací)
- nízkoodběrové čipy
- nízká cena
- jednoduché použití

MID-RANGE

Zahrnuje ty PIC12 a PIC16. 8 až 64 pinová pouzdra. Typy s flash pamětí pracují s napětím v rozsahu od 2V do 5V, mají několikanásobné A/D kanály, EEPROM paměť dat. Kontrolery PIC16 umožňují spolupracovat s různými periferiemi, jako USB, SPI, I²C, USART, LCD.

Výhody:

- nízkoodběrové čipy
- bohatá periferní sada
- operační výkon 5 MIPS
- optimální poměr cena – výkon

3.5.1 Typ mikrokontroléru

Pro výsledné zařízení pro řízení všech 4 senzorů jsem vybral 8 bitový mikrokontrolér firmy Microchip PICF877, jedná se mikrokontrolér třídy MID-RANGE. Tento kontrolér byl vybrán z důvodu přijatelné ceny, počtu vstupně výstupních pinů (33), počtu analogových vstupů. PIC16F877 neobsahuje interní oscilátor, je třeba použít externí RC, nebo krystalový oscilátor. Ve svém zařízení jsem použil externí krystalový oscilátor, protože je přesnější než-li RC oscilátor, a protože používám sériovou komunikaci přes USART, kde je potřeba zabezpečit přesnou frekvenci oscilátoru kvůli chybám přenosu po sériové lince. Krystal jsem volil o frekvenci 3,6864 MHz, kde při přenosové rychlosti 9,6 kBAUD je chyba 0%. Krystal je potřeba připojit paralelně ke dvěma kondenzátorům 33 pF, také dle doporučení výrobce. Dále jsem paralelně k napájecímu napětí proti zemi použil kondenzátor 100 nF, proti rušení, stejně jako ke každému integrovanému obvodu, který je použit v celém zařízení.

3.5.2 Microchip PIC16F877

Patří do rodiny PIC16FXX. Jsou to univerzální 8-mi bitové jednočipové mikrokontroléry. Všechny tyto mikropočítače jsou vyrobeny technologií CMOS a jsou založeny na rozšířené architektuře RISC (redukovaná instrukční sada). Mají oddělenou programovou a datovou paměť (Harvardská architektura). Vnitřní systém redukuje nutnost připojení externích obvodů na minimum, čímž zlevňuje konečné aplikace [11].

Základní vlastnosti mikropočítače:

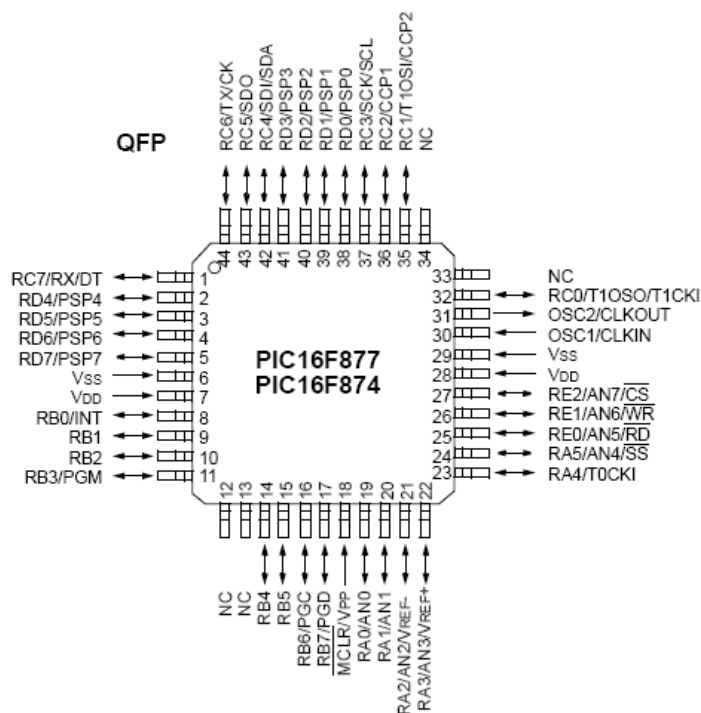
- CPU na bázi RISC (redukovaná instrukční sada)
- sada 35 instrukcí
- všechny instrukce jsou prováděny během jednoho cyklu, kromě instrukcí větvení programu, které jsou prováděny během dvou cyklů
- pracovní frekvence (taktovací frekvence) – 20MHz
- doba vykonání instrukce – 200ns
- paměť programu (flash) 14kB

- 368B paměti RAM
- paměť dat EEPROM 256B
- zdroje přerušení (až 14 zdrojů)
- osmiúrovňový hardwarový zásobník
- nepřímé, přímé, relativní adresování
- Power-on Reset (POR), RESET po zapnutí
- Power-up Timer (PWRT), časovač po zapnutí
- Watchdog (WDT)

Popis periférií:

- dva 8-bitové čítače, jeden 16-bitový
- univerzální asynchronní synchronní přijímač/vysílač USART s 9-bitovou detekcí
- synchronní sériový port MSSP (SPI/I²C), SPI master mód a I²C (slave/master)
- paralelní 8-bitový slave port (PSP), s externím signálem RD, WR a CS
- In-Circuit Serial Programming (ICSP), programování pouze pomocí dvou pinů
- 10-bitový A/D převodník (8 kanálů)
- 2 komparátory
- maximální proud z výstupu jednoho pinu 25mA
- TMR0: 8-bitový čítač/časovač s osmibitovou programovatelnou předděličkou
- TMR1: 16-bitový čítač/časovač s programovatelnou předděličkou
- TMR2: 8-bitový čítač/časovač s programovatelnou předděličkou
- Dva PWM moduly (záchytný a porovnávací)
- teplotní rozsah 40 až 125°C
- pracovní napětí 2 V až 5,5 V
- Nízká spotřeba proudu:
 - < 0,6mA při napájení 3 V, 4 MHz
 - 20 µA při napájení 3 V, 32 kHz
 - < 1µA při standby režimu

- Pouzdra typu PDIP, PLCC, QFN, TQFP [2]



Obr. 3.5: Pin diagram mikrokontroléru PIC16F877

3.5.3 Popis mikrokontroléru PIC16F877

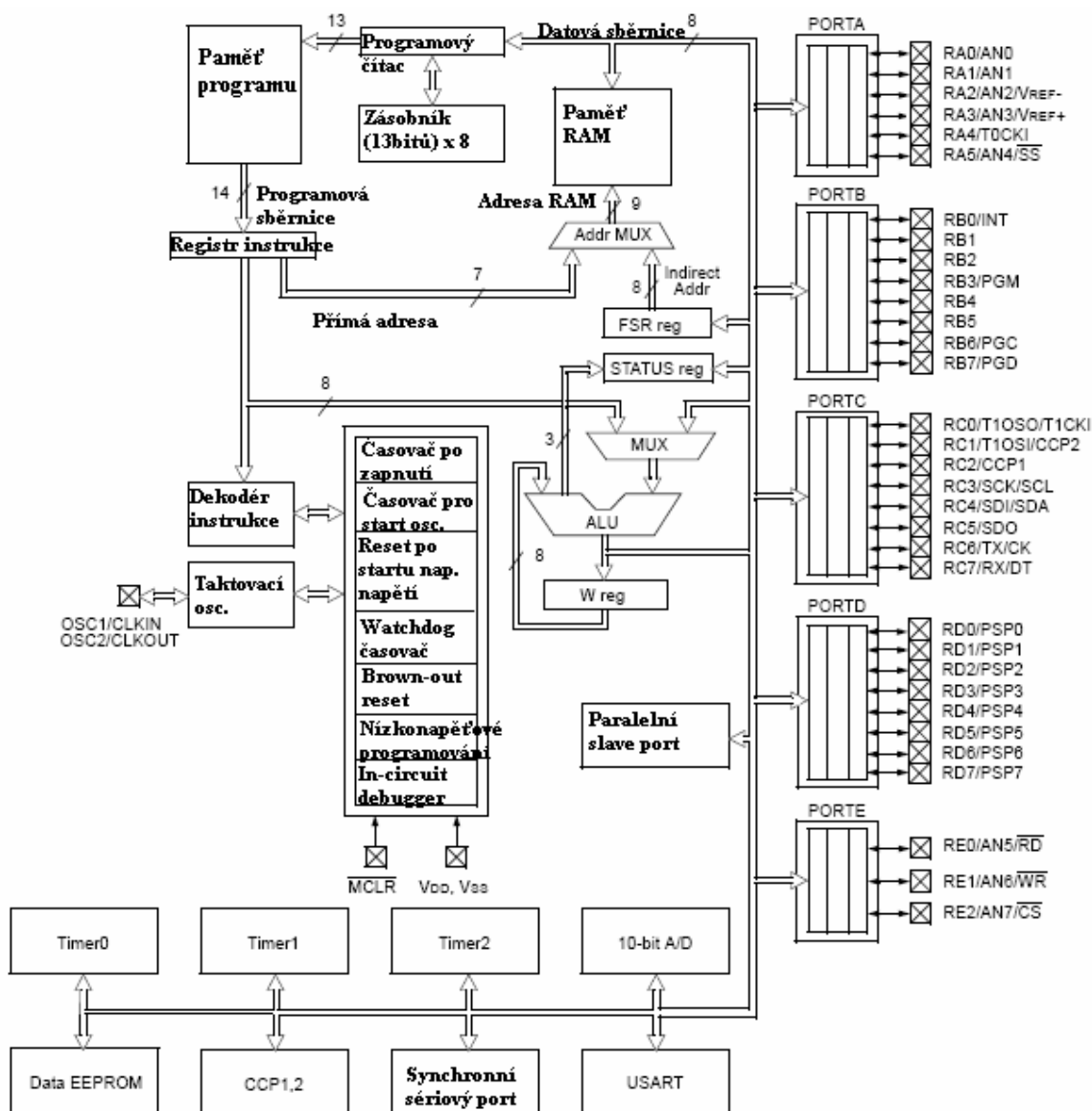
Tento mikrokontrolér patří do střední třídy firmy microchip. Blokové schéma je na obr.3.6. Velikosti pamětí: paměť programu má velikost 8K, paměť dat 368 bajtů, paměť dat má velikost 256 B. Data jsou šířky 8 bitů, kód programu 14 bitů. Tato šířka instrukčního slova umožňuje mít všechny instrukce proveditelné během jednoho instrukčního cyklu. Kontrolér má 33 vstupně výstupních uživatelsky konfigurovatelných vývodů. Jak lze vidět z obr.3.6 vnitřního zapojení mikrokontroléru, má pět portů PORTA až PORTE. Porty lze uživatelsky nastavit [2]. ALU umožňuje odčítat, sčítat, logické operace, posouvat obsah registru [11]. Pro aritmetické operace se používají dva operandy, jeden je ve W registru (pracovním registru) a druhý je registr v paměti nebo konstanta [11].

Porty:

Mikrokontrolér PIC 16F877 má 5 portů PORTA, PORTB, PORTC, PORTD a PORTE. Porty se nastavují v registrech TRISA až TRISE, mohou být nastaveny jako vstupní, nebo výstupní, mají i další možnosti nastavení. Například sériová komunikace, A/D vstupy, čítač.

PORTA má funkce nastavení: vstupně výstupních pinů, analogových vstupů, napěťové reference pro A/D převodník, vstup TIMER0, slave select pro synchronní sériový port [2].

Vývod RA4 má na vstupu Schmittův obvod a jako výstup otevřený kolektor. Ostatní vývody tohoto portu mají jako vstupní úroveň TTL. Každý vývod může být nastaven dle potřeby jako výstup nebo vstup nezávisle na ostatních. Pokud chceme nastavit některý z vývodů jako výstupní, je potřeba příslušný bit nastavit na log.0. Jestliže některý vývod nastavíme do log.1, bude tento pracovat jako vstupní. Pin RA4 lze nastavit jako vstup pro hodinový signál. Ostatní piny jsou zapojeny jako vstup A/D převodníku, registrem ADCON1 se nastaví převodník [11].



Obr. 3.6: Blokový diagram mikrokontroléru PIC16F877

PORTB

Je to 8-bitový port. V registru PORTB se nastavují stejným způsobem vstupy, nebo výstupy pinů, stejně jako u PORTu A. Pokud je nastavena hodnota TRISB na log.1, je

příslušný vývod definován jako vstupní a naopak. Každý vývod PORTB může mít softwarově přepojen pull-up odpor, pokud jsou vývody konfigurovány jako vstupní. Pokud jsou vývody RB4, RB5, RB6, RB7 konfigurovány jako vstupní mohou být nastaveny jako vývody, které vyvolají přerušení při změně stavu. Dva piny PGC a PGD jsou určeny k In-circuit programování.

PORTC

PORTC je 8-bitový. Registrem TRISC se nastavují příslušné piny jako vstupní nebo výstupní stejným způsobem jako u TRISA a TRISB. 2 piny lze nastavit pro sériovou komunikaci UART, výstupy portu C umožňují nastavení pro komutaci I²C, SPI, nebo USART. PORTC umožňuje nastavit vstupy pro TIMER1.

PORTD

8-bitový port, vstupně výstupní piny, nebo nastavení paralelních slave bitů, bit 0 až bit 7. Celý port má na vstupech Schmidtův obvod. Registrem TRISD se nastavují příslušné vývody jako vstupní nebo výstupní.

PORTE

3-bitový port. Vstupně výstupní piny, nebo nastavení řízení paralelní linky RD - read operation, WD - write operation, CS - chip select [2]. Registrem TRISE se nastaví vývody jako vstupní (log.1), nebo výstupní (log.0).

TIMER0 čítač/časovač

Má základní vlastnosti:

- šířka registru 8-bitů
- registr TMR0 lze z něj číst i zapisovat
- vnější nebo vnitřní zdroj hodinového signálu (lze volit)
- lze volit aktivní hranu vnějšího hodinového signálu (sestupná nebo náběžná hrana)
- programovatelná předdělička

TIMER1 čítač/časovač

Základní vlastnosti:

- 16-bitový čítač/časovač
- do registrů TMR1L a TMR1H lze číst nebo zapisovat jejich obsah
- vnější nebo vnitřní zdroj hodinového signálu

- TIMER1 může pracovat v synchronním nebo asynchronním režimu

TIMER2 čítač/časovač

Základní vlastnosti:

- 8-bitový čítač/časovač je možné předřadit předděličku, další je možné zařadit za TIMER2
- z pracovního registru TMR2 lze číst i zapisovat
- je vybaven registrem periody PR2
- výstupní signál z TIMER2 odpovídá přetečení registru TMR2 z FFh na 00h, tento signál může být pak vydělen pomocí předděličky, s dělícím poměrem od 1:1 do 1:16

Synchronní sériový port MSSP

Jde o sériové rozhraní, které slouží pro komunikaci s dalšími periferiemi. Jedná se o další mikroprocesor, řadiče displejů, A/D převodníky. MSSP může pracovat ve dvou režimech SPI (Seriál Peripheral Interface) a I²C (Inter-Integrated Circuit) [2].

SPI umožňuje souběžně vysílat i přijímat data. Pro komunikaci a propojení s dalšími periferiemi se používají tři vývody: serial data out (SDO), serial data in (SDI), serial clock (SCL). Může být použit i čtvrtý vývod v režimu slave. Jedná se o vývod slave select (SS), který slouží k výběru zařízení (periferie). Pomocí nastavení bitů v registru SSPCON a SSPSTAT lze nastavit: polarita hodinového signálu, rychlost hodinového signálu (pouze v master režimu), režim master (SCK vývod je výstup hodinového signálu), režim slave (vývod SCK je vstup hodinového signálu), aktivní hrana (sestupná nebo vzestupná hrana určuje platnost dat) [2].

I²C

Ke komunikaci jsou použity pouze dva vývody. Vývod RB4/SCK/SCL je určen pro hodinový signál, druhý vývod SDI/SDA je určen pro data. Pro správnou komunikaci se musí nastavit vývody sloužící pro komunikaci I²C pomocí registru TRISB na hodnotu log.1. Modul komunikace I²C má několik registrů pro komunikaci: SSPCON řídící registr, SSPSTAT stavový registr, SSPADD adresový registr (zde se zadává adresa zařízení s kterým právě mikrokontrolér komunikuje), SSBUF sériová vysílací/přijímací vyrovnávací paměť. Nastavením registru SSPCON můžeme nastavit následující operace komunikace I²C:

- slave režim I²C s 7-bitovou adresou
- slave režim I²C s 10-bitovou adresou

- slave režim I²C s 7-bitovou adresou s povolením přerušení bitem Start a Stop povolující Master režimu ovládaného pomocí firmware [11]
- slave režim I²C s 10-bitovou adresou s povolením přerušení bitem Start a Stop povolující Master režimu ovládaného pomocí firmware [11]
- master režim I²C, který je ovládaný pomocí firmware s povolením přerušení bitem Start a Stop [11]

Důležité je, aby byl na výstupech SCL a SDA zajištěn stav log.1. Toto je zajištěno dvěma externími rezistory.

Podrobnější informace o nastavení, spuštění a adresování I²C jsou v kapitole 2.4.1. komunikace přes I²C.

USART

Jedná se o univerzální asynchronní/synchronní vysílač/přijímač. Může být nastaven jako obousměrný asynchronní komunikační port (duplexní přenos dat). USART lze použít i jako synchronní port k připojení pamětí A/D převodníků [2]. USART může pracovat celkově ve třech režimech: synchronní master, synchronní slave, asynchronní (duplexní). Pro dva režimy USART se používá generátor hodinového signálu a to pro asynchronní a synchronní. Generátor hodinového signálu je 8-bitový čítač [2]. Je nutné nastavit přenosovou rychlost. Ta závisí na obsahu registru SPBRG a taktovací frekvenci mikrokontroléru. Do registru SPBRG je uložena celočíselná hodnota v rozsahu 0-255, kterou lze vyčíst z tabulky přenosových rychlostí v datasheetu, kde je uvedeno pro jakou frekvenci oscilátoru je hodnota určena a s jakou chybou jak je vidět na tab.1 [2]. Pro přenosovou rychlost 9,6 kBAUD, byla vybrána frekvence oscilátoru 3,6864 MHz, kde je chyba 0%.

Tab. 3.1: Přenosové rychlosti pro asynchronní režim (skupina vyšších rychlostí BRGH=1)

BAUD RATE (K)	Fosc = 4 MHz			Fosc = 3.6864 MHz		
	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)	KBAUD	% ERROR	SPBRG value (decimal)
0.3	-	-	-	-	-	-
1.2	1.202	0.17	207	1.2	0	191
2.4	2.404	0.17	103	2.4	0	95
9.6	9.615	0.16	25	9.6	0	23
19.2	19.231	0.16	12	19.2	0	11
28.8	27.798	3.55	8	28.8	0	7
33.6	35.714	6.29	6	32.9	2.04	6
57.6	62.500	8.51	3	57.6	0	3
HIGH	0.977	-	255	0.9	-	255
LOW	250.000	-	0	230.4	-	0

Asynchronní režim USART

V tomto módu používá USART 1 start bit, 8-9 datových bitů, jeden stop bit. Nejčastěji se používá přenos pomocí 8 datových bitů. Dají se nastavit všechny běžně používané přenosové rychlosti (pomocí vlastního generátoru hodinového signálu). Vysílání a příjem může probíhat v tomto módu nezávisle na sobě, za podmínky dodržení formátu komunikace a přenosové rychlosti. První je vysílán a přijímán bit LSB (nejméně významný) [2]. V režimu SLEEP není možné použít asynchronní mód. Vynulováním bitu SYNC v registru TXTA<4> je zvolen asynchronní přenos.

Asynchronní vysílač USART

USART se skládá z následujících částí:

- vzorkovací obvod
- generátor hodinového signálu (baud rate generator)
- synchronní vysílač
- asynchronní přijímač

Pro asynchronní vysílání je důležité dodržet následující body:

- pro nastavení požadované přenosové rychlosti nastavit správně registr SPBRG a BRGH bit
- nulováním bitu SYNC a nastavením bitu SPEN povolit asynchronní sériový přenos
- pro požadavek přerušení, povolit nastavením bitu TXIE
- nastavit bit TX9 pro 9. bitový přenos pokud je požadován
- povolení vysílání nastavením bitu TXEN, nastaví to i bit TXIF
- zapsat devátý bit do bitu TX9D, pokud je používána 9. bitová komunikace
- pro start vysílání se musí se zapsat data do výstupního registru TXREG
- jestliže je použito přerušení, je potřeba se ujistit, zda-li jsou nastaveny v registru INTCON bity GIE a PEIE [2]

Asynchronní přijímač USART

Pro příjem je důležité dodržet následující kroky:

- inicializovat SPBRG registr a bit BRGH pro požadovanou přenosovou rychlost
- nulováním bitu SYNC a nastavením bitu SPEN povolit asynchronní sériový přenos

- nastavit bit TX9 pro 9. bitový přenos pokud je požadován
- nastavit povolení přerušení bitem RCIE, pokud je to požadováno
- nastavením bitu CREN povolit příjem
- po příjmu 1. bajtu bude nastaven bit RCIF, způsobí přerušení, je-li povoleno
- přečíst obsah registru RCSTA, určit devátý bit přenosu, případně zjistit chyby
- přečíst přijatý bajt z RCREG registru
- pokud byla během přenosu zjištěna chyba/y, následně je třeba vynulovat bit CREN
- je nutné se ujistit, že jsou správně nastaveny bity přerušení PEIE a GIE v registru INTCON.

Modul master u synchronního režimu USART

V tomto režimu jsou data přenášena tak, že ve stejnou dobu nemohou být přijímána a vysílána. Pokud se vysílá je zakázán příjem dat. Nastavení synchronního módu se provede zvolením bitu SYNC v registru TXSTA <4> [2]. Bit SPEN (RCSTA<7>) je nastaven podle konfigurace RC6/TX/CK a RC7/RX/DT vstupně výstupních pinů pro hodinový signál nebo data. Master mód je nastaven bitem CSRC (TXSTA<7>). Pokud je nastaven režim master, mikrokontrolér vysílá po sběrnici hodinový signál [2].

Modul master u synchronního režimu USART

Od modulu master se liší tím, že hodinový signál pro přenos je zajištěn externě a je přiveden na vývod RC6/TX/CK. V tomto režimu může mikrokontrolér vysílat či přijímat data v režimu SLEEP. Nulováním bitu CSRC (TXSTA<7>) je nastaven režim slave [2].

A/D převodník

Analogově digitální převodník dovoluje převod analogového signálu na digitální signál o datové šířce 10 bitů. Referenční napětí pro horní a dolní mez referenčního napětí lze nastavit buď dvěma vstupy RA2 a RA3, nebo ho lze nastavit softwarově. Převodník může pracovat v režimu Sleep, je ovšem nutné zajistit pomocí interního RC oscilátoru časování [2]. Modul A/D převodníku má čtyři registry kterými jsou:

- ADRESH – registr pro horní část výsledku
- ADRESL - registr pro dolní část výsledku
- ADCON0 – řídicí registr

- ADCON1 – řídicí registr

Registrem ADCON0 se nastavuje ovládání A/D převodníku. Registrem ADCON1 nastavujeme konfiguraci vstupních obvodů. Tyto obvody mohou být nastaveny jako analogové vstupy, nebo digitální vstupy/výstupy. RA2 a RA3 lze nastavit jako napěťovou referenci pro A/D převodník. Je nutné správně nakonfigurovat a připojit vstupní piny.

Nastavením bitu GO/DONE se zahájí A/D převod. Pokud tento bit vynulujeme, právě probíhající převod se zruší a nebudou aktualizovány registry, které obsahují výsledky (ADRESH a ADRESL) [2]. Pokud tedy bude programově přerušen A/D převod vynulováním bitu GO/DONE, registry ADRESH a ADRESL budou obsahovat výsledek předchozího převodu. Jakmile je přerušen převod je nutné počkat minimálně $2T_{AD}$ před dalším vzorkováním. Po uplynutí doby $2T_{AD}$ je automaticky připojen analogový vývod. Měřené napětí musí být připojeno na vstup A/D převodníku určitou minimální dobu, která je potřebná k nabití kondenzátoru, po uplynutí této doby je možné spustit A/D převod. Doba T_{AD} je odvozena od taktovacího oscilátoru a je nutné zajistit aby tato doba byla zvolena v rozmezí od $1,6\mu S$ do $6,4\mu S$. Blokové schéma A/D převodníku je znázorněno na obr. 3.7 [2].

Pro zajištění A/D převodu je důležité dodržet následující body:

1. konfigurovat A/D převodník

- nastavit analogové vstupy, napěťové reference a digitální I/O registrem ADCON1
- nastavit vstupní kanál A/D převodníku registrem ADCON0
- nastavit zdroj časování A/D převodníku registrem ADCON0
- zapnout A/D převodník registrem ADCON0

2. konfigurovat přerušení (pokud je použito)

- vynulovat ADIF bit
- nastavit bit GIE
- nastavit bit ADIE
- nastavit bit PEIE

3. počkat dobu nezbytnou k nabití vzorkovacího kondenzátoru

4. start převodu

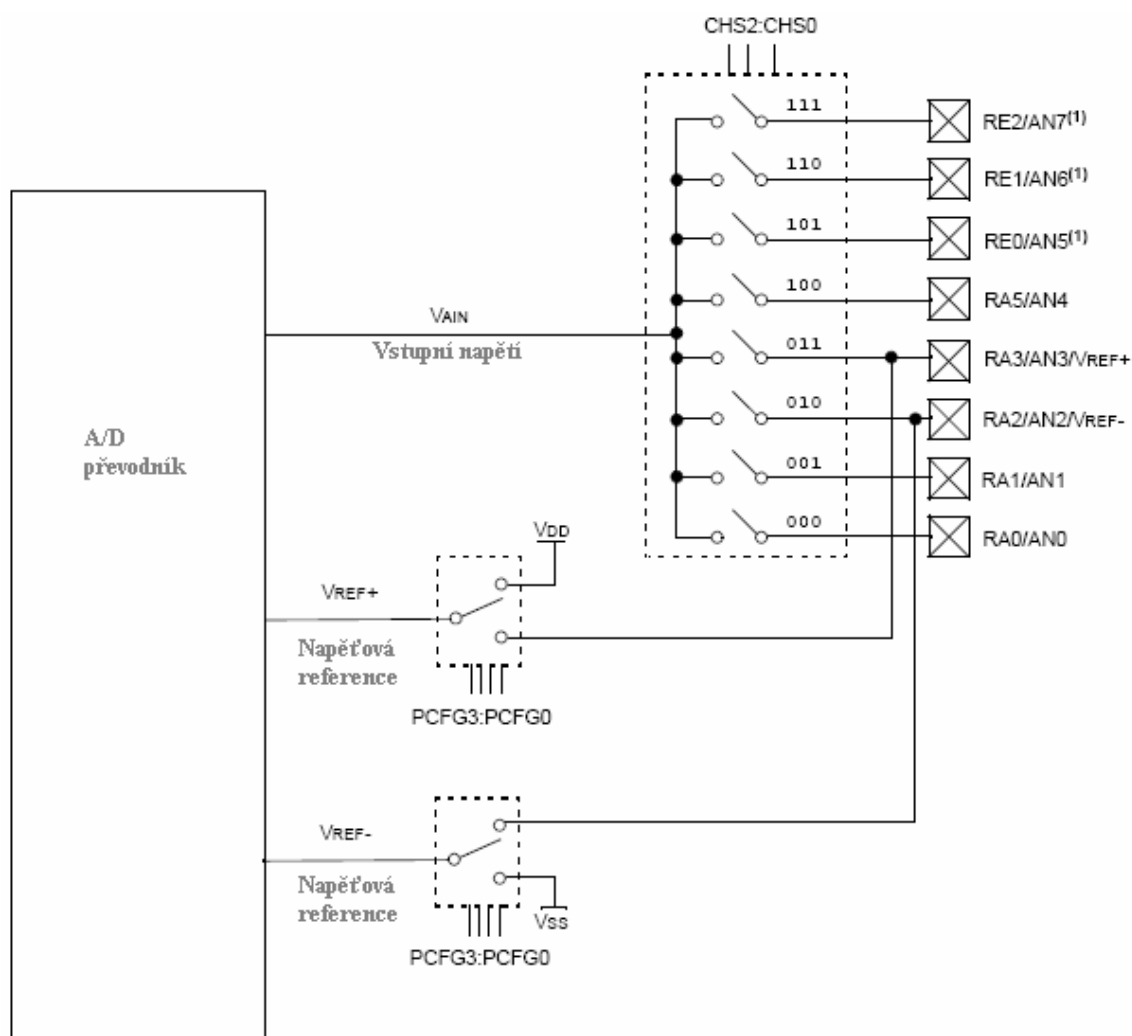
- v registru ADON0 nastavit bit GO/DONE

5. počkáme až bude A/D převod dokončen a to dvěma způsoby:

- čekat na přerušení, A/D přerušení
- otestovat GO/DONE bit, jestli nebyl nulován (bez použití přerušení)

6. z dvojice registrů ARESL a ADRESH přečíst výsledek převodu, vynulovat bit ADIF, jestliže je používán

7. pro následující převod postupovat krokem 1 nebo 2. Doba A/D převodu je definována po částech jako T_{AD} . Minimální čas čekání na další start převodu je $2T_{AD}$



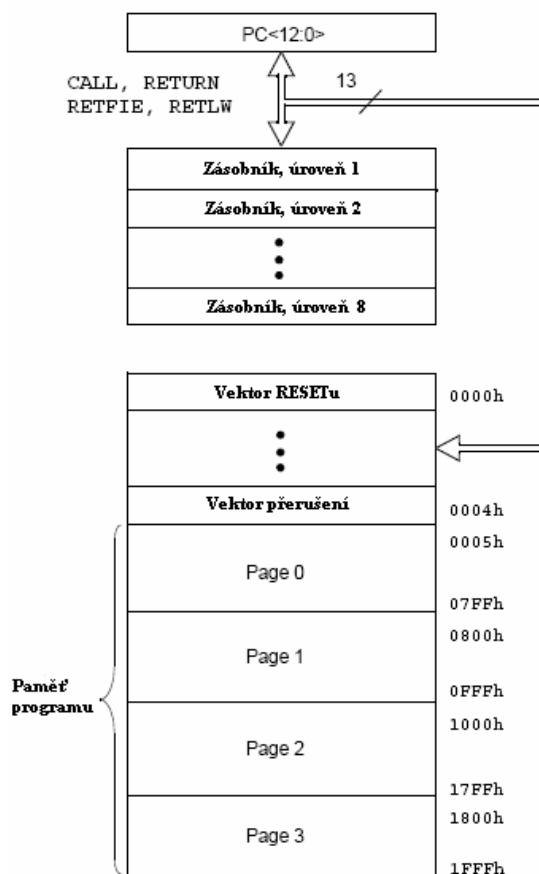
Obr. 3.7: Blokový diagram A/D převodníku mikrokontroléru PIC16F877

3.5.4 Organizace paměti

V mikrokontroléru PIC16F877 jsou tři paměťové bloky paměť programu, paměť dat a EEPROM paměť (tuto paměť lze zahrnout do paměti dat). Paměť programu a paměť dat mají samostatné sběrnice [2].

3.5.5 Organizace paměti programu

PIC16F877 obsahuje 13-bitový programovatelný čítač, adresuje až 8K x 14bitů prostoru v paměti programu. Po resetu je inicializována adresa 0000h a po přerušení adresa 0004h [2].



Obr. 3.8: Mapa zásobníku a paměti programu

3.5.6 Organizace paměti dat

Paměť dat je rozdělena do několika bank, které obsahují universální registr a speciální funkční registr. Bity RP1 a RP0, slouží k výběru bank. Každá z bank má šířku až 7Fh (128 bytů). Nižší umístění každé z bank v paměti je rezervováno pro speciální funkční registry. Nad úroveň speciálního funkčního registru je universální registr, realizovaný jako paměť RAM. Speciální funkční registry jsou používány CPU a dalšími periferními jednotkami pro ovládání požadované operace [2].

3.6 D/A převodník

Jelikož mikrokontroléry PIC v sobě nemají zaimplementovaný D/A převodník, je nutné použít externí, a ten bude řízen mikrokontrolérem. Jedná se obvod TC1320, je to 8-bitový D/A převodník, u kterého je zajištěna komunikace po sériové lince.

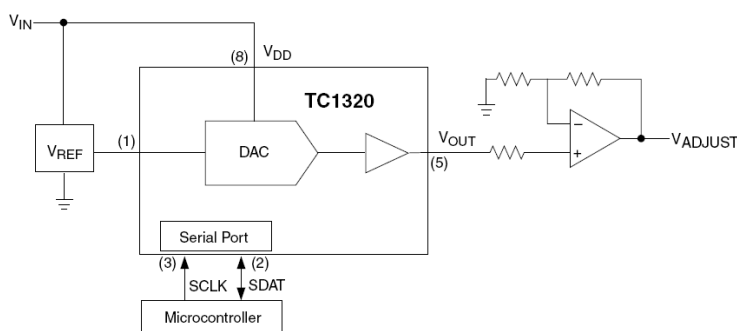
Specifikace:

- ± 2 LSB INL
- $\pm 0,8$ LSB DNL
- 2,7 V až 5,5 V napájecí napětí
- komunikace přes sériovou linku I²C
- malý odběr: 350 μ A při převodu, 0,5 μ A při shutdown
- 8-pinové pouzdra SOIC, 8-pinové pouzdra MSOP

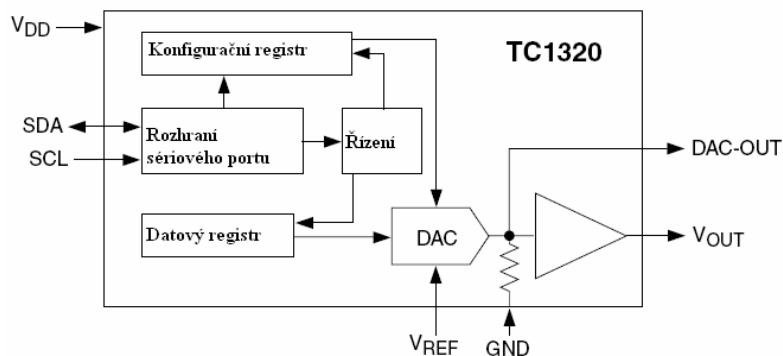
Použití:

- programovatelné napěťové zdroje
- digitálně řízené zesilovače/
- proces monitorování a kontroly

Převodník TC1320 má široký rozsah napájecího napětí 2,7 V až 5,5 V, komunikuje prostřednictvím sériové I²C. Typické zapojení obvodu je na obr. 3.9, kde V_{ref} je referenční zdroj napětí, které musí být o 1,2 V menší než napájecí napětí. V_{DD} je napájecí napětí. SCLK – obousměrný hodinový vstup. SDAT – obousměrný datový kanál. V_{OUT} – výstupní napětí.



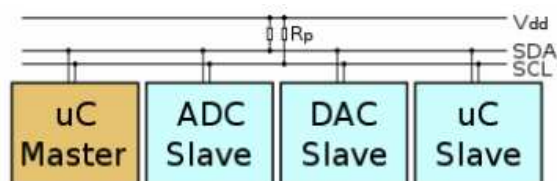
Obr. 3.9: Typické zapojení D/A převodníku TC1320



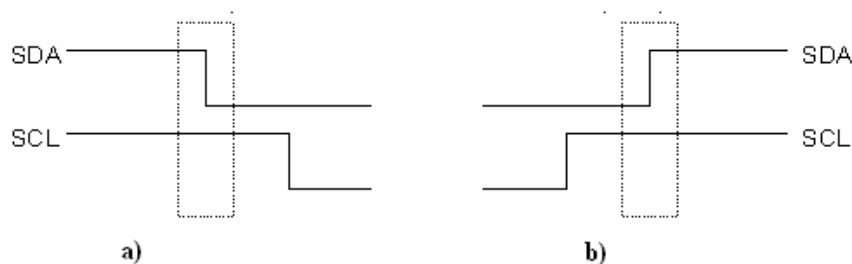
Obr. 3.10: Blokový schéma TC1320

3.6.1 Komunikace přes I²C

Sériový hodinový vstup SCL a obousměrný datový kanál SDA, je připojen pro komunikaci s vnějšími periferiemi pouze dvěma vodiči. Sběrnice propojuje dvě nebo více zařízení na master (řídící) a slave (řízené). Zařízení master generuje hodinový signál SCL [4].



Obr. 3.11: Zapojení sběrnice I²C [4].



Obr. 3.12: Časové průběhy na sběrnici I²C a) start komunikace, b) konec komunikace.

Postup komunikace po sběrnici I²C:

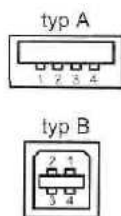
Start převodu (start condition) – SDA je v logické 0, posléze i SCL. Poté je adresováno zařízení, se kterým bude master komunikovat. Po startu převodu musí master odeslat 7-bitovou adresu, pro TC1320 je to v binárním čísle 10010000. Data na SDA jsou platná v okamžiku odeslání. Dále je tam jeden bit R/W, indikující čtení, nebo zápis [4]. Následuje čekání na potvrzení od slave ACK (acknowledge), tento bit je v logické 1 a je určen k tomu, aby řídicí obvod mohl přijímat. Konec převodu (stop condition) – je ukončen přechodem

hodin SCL z logické 0 na logickou 1. Pro každé zařízení, které je připojeno k I²C sběrnici je přidělena určitá 7 – bitová adresa. Po podmínce start, obvody připojené ke sběrnici porovnávají svojí adresu s adresou, která je vysílána po sběrnici. Pokud se adresa shoduje s adresou některého obvodu, tento potvrdí bitem ACK. Potom vysílá, nebo přijímá další data [4]. Po každém vyslaném bytu a vyslané adrese, je poslán potvrzující bit ACK. Vysílací zařízení jej vysílá v log. 1 a přijímací zařízení potvrdí přijetí tak, že v době vysílání ACK je SDA v log. 0 [4]. Pokud vysílací zařízení (master) nedostane podmínku přijetí, ukončí se vysílání.

3.7 Komunikace s PC

3.7.1 USB

U mého zařízení je zajištěna komunikace s PC přes sériovou linku USART z mikrokontroléru přes převodník FTDI232RL a sériové rozhraní USB. Přenosové rychlosti USB se pohybují od 1,5Mb/s (USB 1.1) do 480Mb/s (USB 2.0), připojení zařízení na vzdálenost až 5m. Počet zařízení, které lze připojit (při připojitelnosti hubu až 127) [3]. Plug&Play (zařízení lze připojit za provozu) [3]. Konektor USB obsahuje 4 vývody, úroveň napětí je v rozsahu 0-3,3V, napájecí napětí je 5V. K připojení jsem použil kabel typu A-B, přičemž konektor typu B je připájen k desce zařízení.



Obr. 3.13: USB konektory (1- napájení +5V, 2- data+, 3- data-, 4-zem)

3.7.2 FTDI232RL

Jde o obvod pracující jako konvertor USB – USART. USB je tedy možné jednoduše propojit s vnějším zařízením. Komunikace po asynchronní sériové lince je jednodušší než po paralelní sběrnici [3].

Základní vlastnosti obvodu:

- integrovaný regulátor 3,3V pro USB obvody
- integrovaný konvertor UART úrovní pro 5V a 3,3V logiku
- LED signalizace řídicích signálů (vysílání, příjem)
- integrovaný Power-On-Reset obvod

- kompatibilita se standardy USB 1.1 a USB 2.0
- integrovaný oscilátor - nepotřebuje externí krystal

Softwarová podpora:

Pro operační systémy:

- Windows 98, 98SE, ME, 2000, Server 2003, XP.Windows Vista / Longhorn
- Windows XP 64-bit
- Windows XP Embedded
- Windows CE.NET 4.2 & 5.0
- MAC OS 8 / 9, OS-X
- Linux 2.4 a vyšší

Integrovaný hodinový obvod:

Předchozí generace FTDI USB UART potřebovaly k funkci externí krystalový oscilátor. Obvod časování byl nyní integrován v pouzdře, znamená to že žádný krystal není potřeba. V případě nutnosti může být použit externí 12MHz krystal [7].

Integrovaná EEPROM:

Předchozí generace FTDI USB UART v sobě neměly implementovanou EEPROM paměť. EEPROM paměť má nyní generace FTDI 232R integrovanou na čipu. Mají tedy volbu měnit produktové nastavení čipu (Produkt ID). Uživatelská oblast interní EEPROM paměti je k dispozici pro uložení dalších dat [7]. EEPROM je programovatelná přímo přes USB bez dalšího externího napájení [7].

Rezistory:

Nynější generace FDI 232R v sobě má integrovány dva rezistory na pinech USB DP a USB DM a jeden pull up rezistor na pinu USB DP o velikosti 1,5kΩ.

Konfigurovatelný CBUS I/O pin:

FTDI 232R obsahuje konfigurovatelnou řídící sběrnici (CBUS). Volby konfigurace jsou: TXDEN – umožňuje přenos pro RS485, PWREN# - energetická kontrola, pro výkonové sběrnice, TXLED# - signalizace přenosu dat pomocí LED diody, RXLED# - signalizace příjmu dat pomocí LED diody, TX&RXLED# - signalizuje přenos, nebo příjem dat, CLK48/CLK24/CLK12/CLK6 – 48MHz, 24MHz, 12MHz a 6MHz možnost volby kmitočtu

výstupního signálu. Sběrnice CBUS může být konfigurovatelná s nějakou z těchto výstupních voleb, nastavitelnou ve vnitřní EEPROM paměti [7].

VCP ovladače, které vytvoří virtuální sériový port. D2XX přímé ovladače, poskytují další funkce pro operační systémy [3].

Použití:

Převodníky USB, rozhraní pro mikrokontroléry připojitelné přes USB, přenos dat do programovatelných součástek přes USB rozhraní, USB bezdrátové modemy.

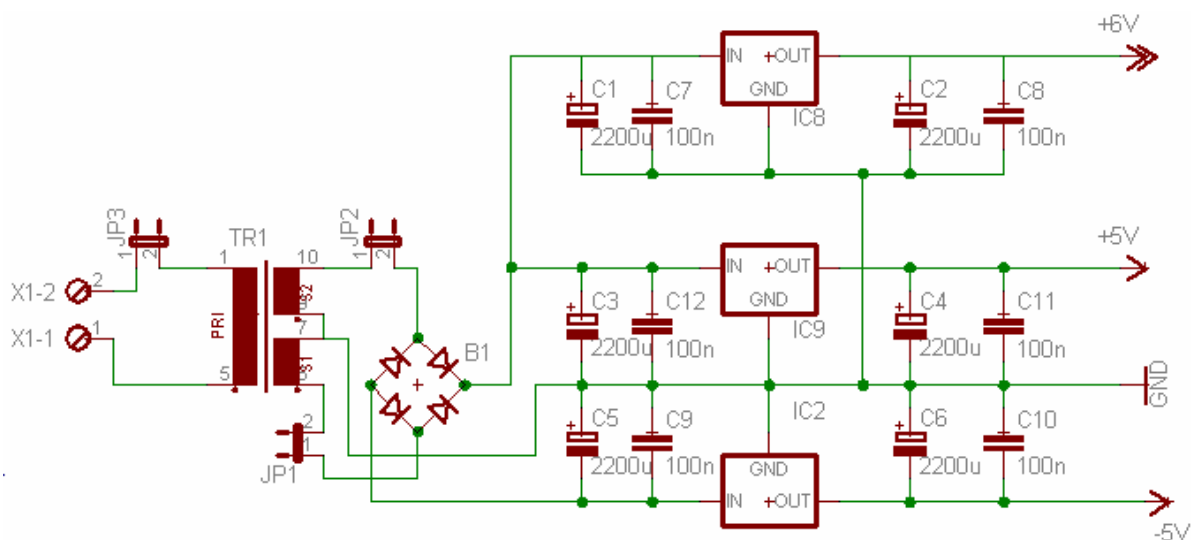
3.8 Použitý software

3.8.1 MPLAB

Mikrokontroléry PIC, které jsem použil jak na testovací DPS, tak na finální mají funkci programování In-circuit programing. Deska se propojí pomocí konektoru s programátorem MPLAB od firmy Microchip. K programátoru je třeba zapojit externí zdroj ss napětí 9 V. S PC je propojen pomocí USB kabelu A-B. Použitý software k programátoru je MPLAB IDE 7.6. Do softwaru je nutné naimplementovat překladač jazyka C BKND, který lze jako freeware verzi stáhnout z internetu. Bez překladače umí standardní software pracovat pouze s assemblerem. Po instalaci MPLAB a překladače BKND, je třeba nastavit s jakým mikrokontrolérem budeme pracovat. Horní lišta → Configure → Select device, zde se nastaví typ použitého kontroleru. Po vytvoření nového projektu je provedena zkouška komunikace, Programmer → Select Programmer → MPLAB ICD2. Pokud je spojení úspěšné je možné vytvořit projekt v jazyce C, překompilovat a nahrát do zařízení. Výhodou tohoto programování je to, že mikrokontrolér není nutné vyjímat z DPS a vkládat ho do programátoru, ale stačí připojit přes konektor programátor a nahrát program tzv. za chodu. Lze tedy i bez vypnutí a vyjmutí programátoru z obvodu zjistit, zda-li je program funkční, například diodami či displejem zapojenými na vstupně výstupní porty mikrokontroléru.

3.9 Obvodové části pro zařízení

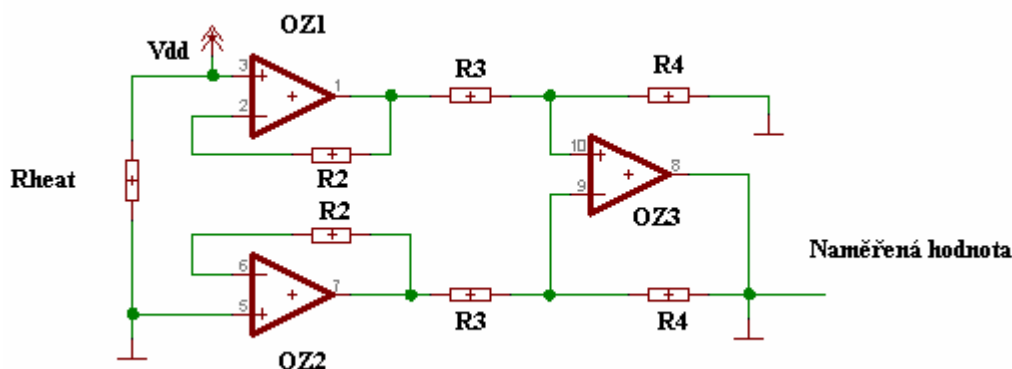
3.9.1 Symetrický zdroj napětí



Obr. 3.14: Schéma zdroje napětí

Základní část zdroje napětí je transformátor 230 V/ 2 x 9 V hermeticky uzavřený. Na konektor X 1-2 a X 1-1 je připojen síťový vypínač, na JP1, JP2, JP3 jsou připojeny pojistky. K usměrnění střídavého napětí je použit graetzův můstek integrovaný do jednoho pouzdra. Ke stabilizaci napětí slouží stabilizátory napětí 7805, 7806 pro kladnou polaritu a 7905 pro zápornou polaritu. Prostřední kontakty sekundárního vinutí transformátoru (2 x 9 V) jsou spojeny a je tak vytvořena zem GND. Protože je potřeba výstupní usměrněné napětí +6 V, +5 V, -5 V, zvolil jsem transformátor s výstupním napětím na sekundárním vynutí 9V. Aby bylo napětí za výstupem usměrňovače hladké, s co nejmenším rozkmitem, je potřeba použít elektrolytický kondenzátor. Zvolil jsem kondenzátory o kapacitě 2200 µF před a za usměrňovače, dále pak keramické kondenzátory o kapacitě 100 nF.

3.9.2 Rozdílový zesilovač s velkým vstupním odporem



Obr. 3.15: Diferenční operační zesilovač. Zapojení je v jednom pouzdře LM123

Uvedený obvod je připojen na napětí +5 V a 0 V. Operační zesilovače OZ1 a OZ2 tvoří diferenční zesilovač s plovoucím výstupem. Vstupní odpor je velký, dosahuje i s bipolárními zesilovači hodnot několika stovek MΩ. Z tohoto zapojení lze získat přístrojový zesilovač použitím dalšího odporu mezi invertující vstupy operačních zesilovačů OZ1 a OZ2 celkový přenos by byl dle vzorce (4) [12].

$$U_{\text{výst.}} = \frac{R_4}{R_3} \cdot \left(\frac{1 + 2R_2}{R_1} \right) \cdot (U_2 - U_1) \quad (4)$$

Zde je ovšem problém, že potřebuji mít rozdíl napětí ve stejném poměru vstupní/výstupní napětí. Proto sem odpor mezi vstupy operačních zesilovačů OZ1 a OZ2 nepoužil a výsledný přenos je tedy (5) [12].

$$U_{\text{výst.}} = \frac{R_4}{R_3} \cdot (U_2 - U_1) \quad (5)$$

Měření je založeno na principu úbytku napětí. Pokud se zvětší odpor Rheater, zvětší se úbytek napětí a tím pádem vznikne větší rozdíl napětí na vstupech diferenčního zesilovače. Výsledné napětí na výstupu bude tomuto odpovídat a je přivedeno na vstupní pin mikrokontroléru (přesněji na vstup A/D převodníku).

Jako operační zesilovač jsem zde použil LM124. V jednom pouzdře jsou na čipu vyrobeny 4 nezávislé operační zesilovače. Vyznačují se vysokým zesílením, byly navrženy pro nesymetrické napájení a pro široký rozsah napětí [13].

Používají se do různých aplikací: převodníky, zesilovače, všechny tradiční obvody, které jsou realizovány napájené nesymetrickým napětím. LM124 jsou kompatibilní s všemi formami logiky. Příkon čipu je vhodný pro aplikace napájené z baterií.

Hlavní rysy:

- zesílení 100 dB
- velká šířka pásma (teplotně ošetřeno) 1 MHz
- široký rozsah napětí 3 V – 32 V nebo pro symetrické napětí $\pm 1,5$ V až ± 16 V
- velmi malý odběr proudu (700 μ A) nezávislý na napájecím napětí
- malý vstupní klidový proud 45 nA
- malý vstupní napěťový offset 2 mV
- malý proudový offset 2 nA

3.9.3 Astabilní klopný obvod

Základní astabilní obvod vytvořený pomocí operačního zesilovače je na obr.3.17. Operační zesilovač OZ1 je vlastně Schmittův klopný obvod. Operační zesilovač musí být napájen symetrický napětím. Horní rozhodovací úroveň je U_{+H} je dána vztahem (6) a dolní rozhodovací úroveň U_{+D} vztahem (7) [12].

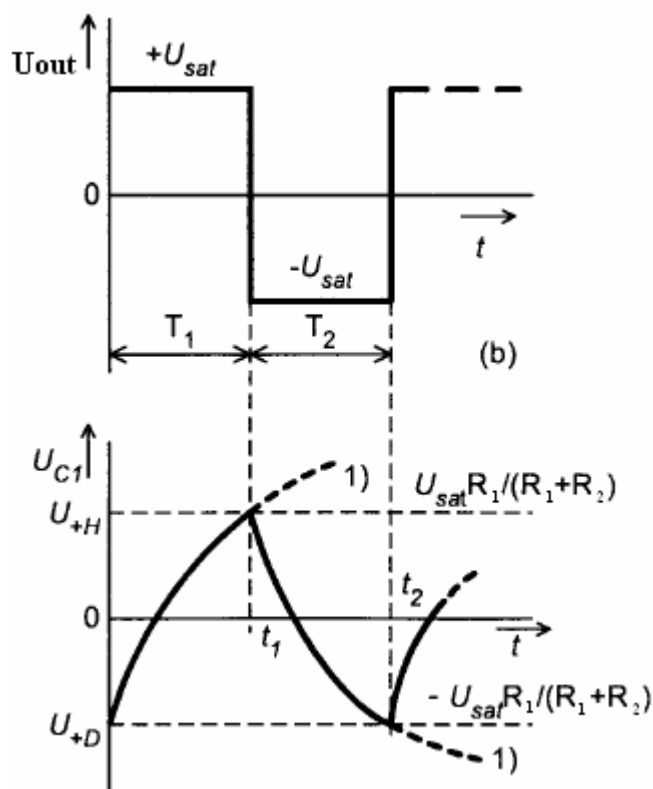
$$U_{+H} = U^{+}_{SAT} \cdot \left(\frac{R_a}{R_a + R_b} \right) \quad (6)$$

$$U_{+D} = U^{-}_{SAT} \cdot \left(\frac{R_a}{R_a + R_b} \right) \quad (7)$$

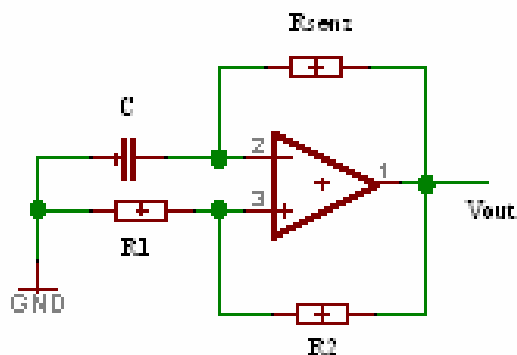
Napětí na kondenzátoru se mění mezi úrovněmi U_{+D} a U_{+H} [12]. Pro frekvenci kmitů platí vztah (8) [12]. Jelikož je potřeba stejný poměr impulzů 1:1, použil jsem v zapojení hodnoty odporů R_1 a R_2 stejné. Výsledný vztah (9) pro stanovení frekvence na výstupu astabilního klopného obvodu [12]. Dosadíme-li do vztahu (9) hodnotu odporu senzoru například 50 k Ω , kondenzátor bude mít hodnotu 100 nF a odpory $R_1 = R_2$ bude pak výsledná frekvence na výstupu AKO $f = 90$ Hz.

$$f = \frac{1}{T} = \left(\frac{1}{\left[2R_{senz} \cdot C \cdot \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right) \right]} \right) \quad (8)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{(2R_{senz} \cdot C \cdot \ln 3)} = \frac{1}{(2 \cdot 50 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9} \cdot \ln 3)} = 91,02 Hz \cong 90 Hz \quad (9)$$



Obr. 3.16: Časové průběhy napětí na kondenzátoru AKO



Obr. 3.17: Schéma astabilního klopného obvodu

Pokud v čase $t=0$ je napětí na kondenzátoru U_C rovno hodnotě napětí U_{+D} a napětí na výstupu U_{out} přešlo do stavu $+U_{sat}$, napětí na neinvertujícím vstupu přejde tedy na hodnotu U_{+H} . Přes R_{senz} se nabíjí kondenzátor a v čase t_1 dosáhne úrovně U_{+H} jak je vidět na obr. 3.16. Tím se mění úroveň na výstup na $-U_{sat}$. Napětí přejde na úroveň U_{+D} , kondenzátor C se vybíjí přes odpor senzoru do hodnoty $-U_{sat}$ z hodnoty $+U_{sat}$. V čase t_2 bude mít napětí na kondenzátoru U_{+D} [12]. Důležité je, aby odporu senzoru byl měřen střídavým napětím

Platí tedy, že pokud $R_1 = R_2$ tak změna odporu R_{senz} vyvolá změnu frekvence na výstupu stabilního klopného obvodu. Čím bude odpor senzoru vyšší, tím bude frekvence na výstupu AKO menší a naopak. V praktické části diplomové práce jsou pak zobrazeny naměřené průběhy na výstupu AKO.

Pro tento obvod byl zvolen operační zesilovač typu TL084. Je tvořen JFET tranzistory. Mezi hlavní znaky tohoto obvodu patří: nízký příkon, velký napěťový rozsah, malý vstupní offsetový proud, ochrana proti zkratu na výstupu, vysoká vstupní impedance, velký slew rate typicky 13 V/ μ s.

3.9.4 Analogový přepínač 4066D

Všeobecný popis obvodu:

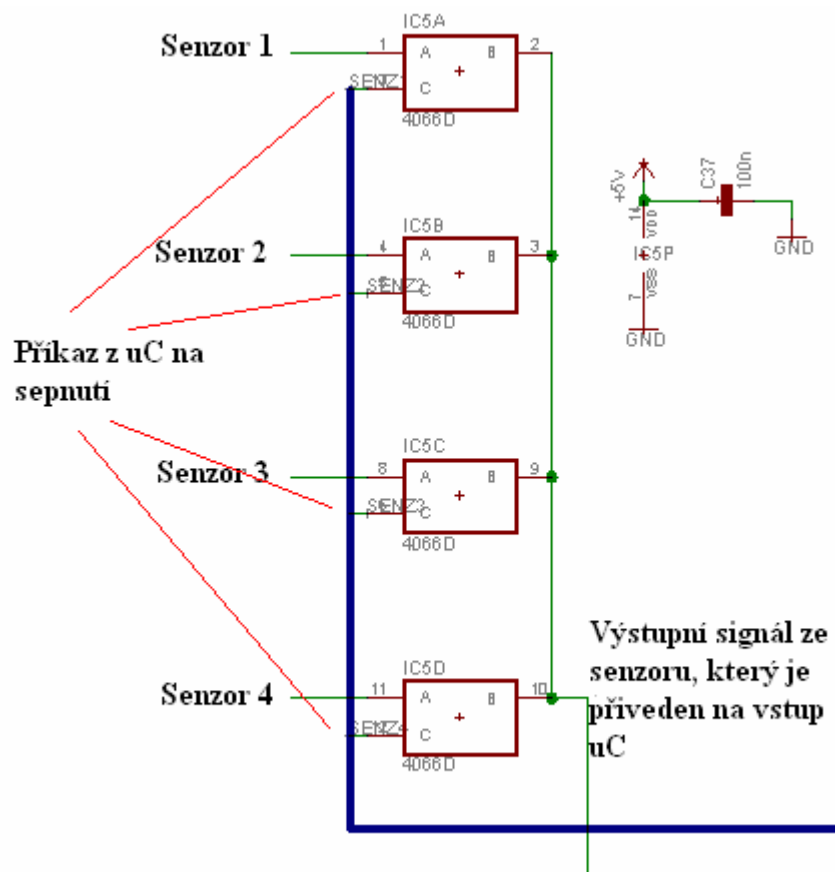
Jde o čtyřnásobný CMOS oboustranný přepínač. Pracuje s napětím od 2,2 V – 5,5 V. Dovede ovládat analogové i digitální signály. Tento obvod se používá k modulaci nebo demulaci, signálové multiplexování pro analogové digitální převod, nebo digitálně analogový převod [13]..

Doporučené provozní podmínky:

- napájecí napětí od 3 V do 15 V
- vstupní napětí od 0 V do V_{DD}
- maximální V_{IL} pro $V_{DD} = 5$ V je 1,5 V
- minimální V_{IH} pro $V_{DD} = 5$ V je 3,5 V

Analogový oboustranný přepínač slouží v obvodu k přepínání výstupních úrovní senzorů. V zařízení je potřeba číst impulzy ze senzoru (změna odporu senzoru vyvolá změnu frekvence na výstupu stabilního klopného obvodu), ale je použit pouze jeden ze vstupů mikrokontroléru. Proto je použit analogový přepínač 4066D, který umožňuje pracovat jak s analogovým signálem, tak i digitálním. V tomto zapojení se postupně volí po časových intervalech spínání jednotlivých senzorů (senzor 1 – senzor 4). K přepínání jsou použity výstupy z mikrokontroléru, přesněji RB2, RB3, RB4, RB5. Výstupy z analogového oboustranného přepínače jsou vodičově spojeny a přivedeny na vstup mikrokontroléru RC0. Přepínání mezi jednotlivými senzory je v časových intervalech 250 ms.

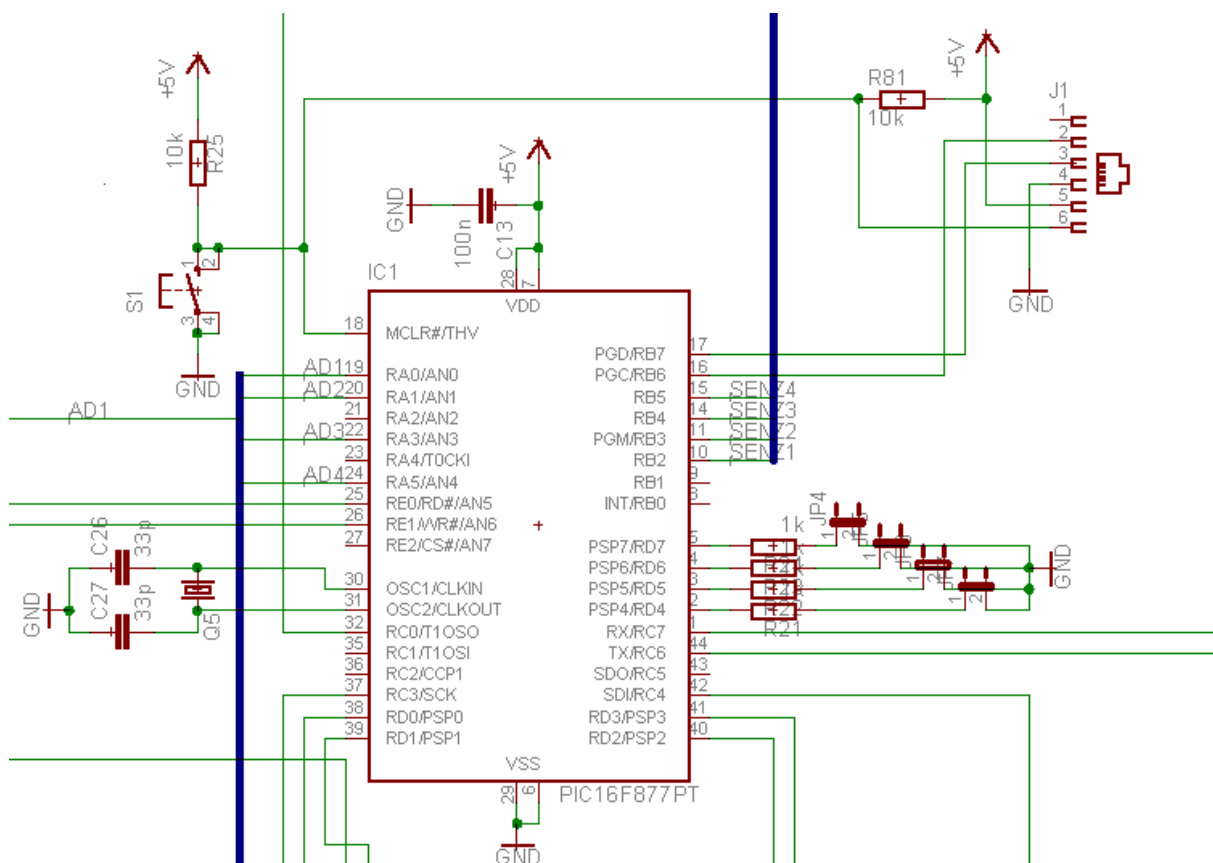
V obvodu je použit ještě druhý analogový přepínač 4066D, který slouží k přepínání výstupu D/A převodníku mezi čtyři neinvertující vstupy diferenčních zesilovačů, přepínání je zabezpečeno pomocí výstupů RD0, RD2, RD3, RD4 z mikrokontroléru.



Obr. 3.18: Schéma obvodu 4066D

3.9.5 Zapojení mikrokontroléru

Na obr. 3.19 je schéma zapojení mikrokontroleru PIC 16F877. K napájení se mikrokontroler připojí piny 28 a 7 pro + 5 V. Piny 29 a 6 připojíme na GND. Mezi kladným napětím a GND je použit keramický kondenzátor 100 nF, kvůli potlačení šumu. Je připojen co nejbližše pouzdru mikropočítače. Ke svorce 18 je přivedeno kladné napětí přes odpor R25, pokud je sepnut mikrospínač S1 tak je vstup 18 (MCLR) spojen se zemí. Toto zapojení slouží k resetu mikrokontroléru. Piny RA0, RA1, R3 a RA5 jsou použity ke snímání napětí na výstupu diferenčního zesilovače, jsou tedy připojeny k modulu A/D převodníku. RE0 a RE1 jsou připojeny k tlačítkům stejně jako S1. Slouží k účelům ukončení programu, nebo přepnutí smyčky programu. Na OSC1 a OSC2 je připojen krystal paralelně s keramickými kondenzátory. Zapojení je podle doporučení výrobce.



Obr. 3.19: Zapojení mikrokontroléru

Vstup 32 je použit k čítání impulzů z výstupů generátorů obdélníkového signálu, tedy k měření koncentrace plynů. RC3/SCK a RC4/SDI slouží ke komunikaci s D/A převodníkem TC 1320 prostřednictvím sériového rozhraní I²C, kde RC4 jsou data a RC4 hodinový takt. RD0, RD1, RD2, RD3 jsou připojeny k obvodu k analogovému přepínači 4066D a slouží k přepínání kanálů na výstupu D/A převodníku. Ke komunikaci prostřednictvím rozhraní USART (Addressable Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter) jsou použity piny RC7/RX a RC6/RTX, jsou připojeny k obvodu FDI 232 RL. K signalizaci je využit port D, přesněji jeho 4 výstupy RD4, RD5, RD6, RD7 přes odpory 680 Ω jsou připojeny LED diody na zem GND. RB2, RB3, RB4, RB5 slouží k přepínání kanálů výstupů senzorů, prostřednictvím analogového přepínače 4066D. RB7/PGD a RB6/PGC se používají k programování mikrokontroléru programátorem MPLAB.

3.10 Výběr součástek pro testovací DPS

Pro testovací desku plošných spojů jsem použil SMD součástky pro kondenzátory a rezistory. Pouzdra operačních zesilovačů a mikrokontroleru jsou typu DIL. SMT technologie pro celé zařízení je použita až u výsledné desky pro řízení 4 senzorů.

Operační zesilovače pro část obvodu určeného ke snímání koncentrace plynu a část pro regulaci proudu vytápění senzoru jsou typu TL084 a jsou zapojeny k symetrickému napájení.

Mikrokontrolér je typu Microchip PIC 16F88. Pro zkušební desku byl vhodný, kvůli nízké ceně, počtu vstupně výstupních portů, obsahuje I²C pro použití externího D/A převodníku, USART pro komunikaci s počítačem přes USB.

FTDI 232 RL je to sériový USB převodník, pro komunikaci s mikrokontrolérem se použije sériová linka USART. Komunikace probíhá tak že se první pošle 7 bitů adresy a následovně data. Je to vhodný obvod, nepotřebuje žádné zvláštní periferie, k funkci je potřeba pouze několik pasivních součástek, zapojení podle datasheetu výrobce čipu.

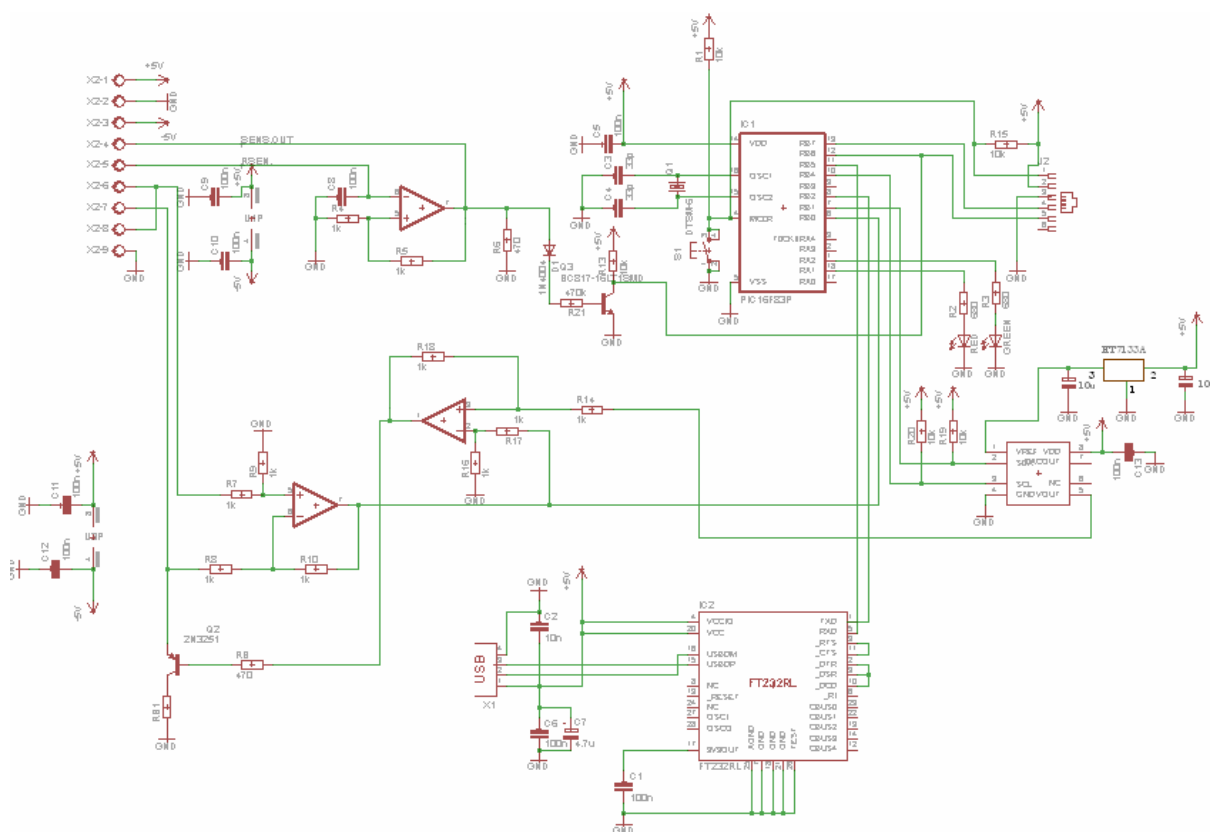
3.11 Výběr součástek pro finální DPS

Pro desku, která se nechala vyrobit ve firmě Pragoboard a slouží jako konečný výrobek jsem použil SMD pasivní součástky. Mikrokontrolér je v pouzdře TQFP, FTDI232RL má pouzdro typu SOIC, stejně tak jako ostatní integrované obvody (operační zesilovač). Na desce je zdroj symetrického napájení, kde je trafo s dvojím sekundárním vinutím 2 x 9 V, střídavé napětí je usměrněno graetzovým můstkem v SMD pouzdru. Stabilizátory jsou v pouzdrech TO 220, elektrolytické kondenzátory jsou taktéž v SMD pouzdru. Senzor je připojen přes konektor k DPS. Celá deska se součástkami je v krabičce, na její zadní straně je konektor k připojení síťového napájení 230V. Jsou tam 3 pojistky, 1 A pojistka na primární vinutí, 2 x 400mA na sekundární vynutí. Na přední straně krabičky je síťový vypínač, dva spínače a čtyři signalizační diody (jsou určeny jak pro testovací účely, tak pro signalizaci měření, posílání dat). Dále jsou na předním panelu dva konektory. Jeden USB typu B a druhý pro in-circuit programování, pomocí programátoru MPLAB od firmy Microchip.

4 Praktická část práce

4.1 Testovací DPS

Slouží k ověření funkčnosti důležitých částí obvodu, jako je regulace vytápění senzoru, měření odporu elektrod, zprovoznění D/A převodníku. Na obr. 1 je schéma zapojení testovací DPS.



Obr. 4.1: Schéma testovací DPS

Výroba

Protože součástí práce je realizace zařízení, což zahrnuje vytvoření desky plošných spojů (DPS), je zde uveden technologický postup zhotovení DPS. Deska byla zakoupena přímo s pozitivním rezistem. Na zhotovení vodivých cest byla proto použita pozitivní maska.

Použité materiály:

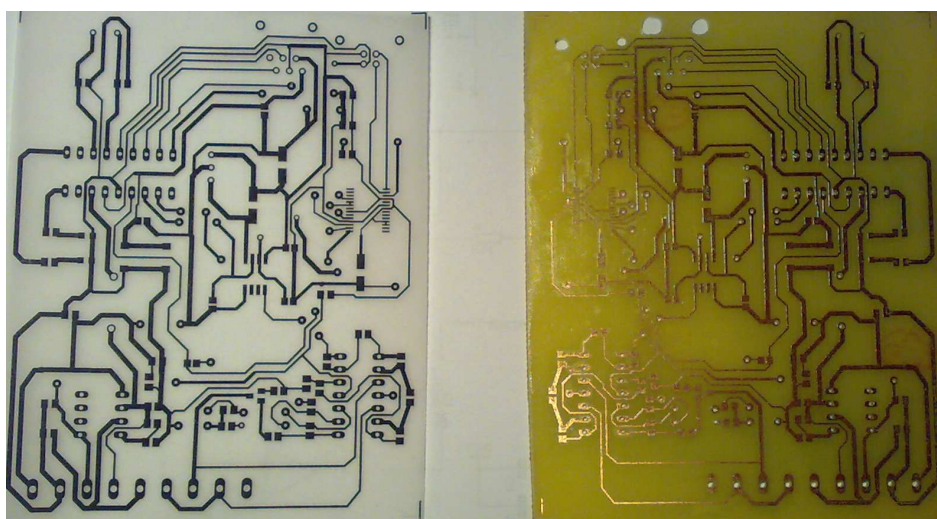
- leptací roztok FeCl_3
- vývojka 1,5% NaOH
- ředidlo
- konformní lak SK10

- FR4 s naneseným fotorezistem
- vrtačka na plošné spoje

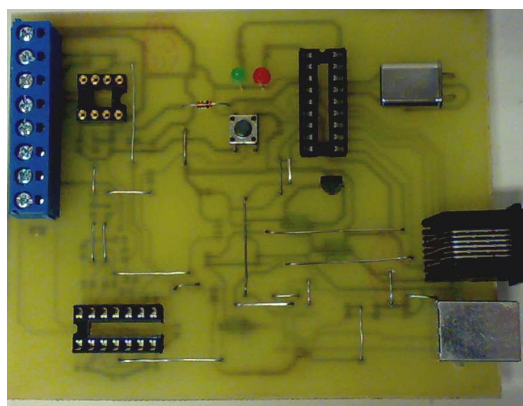
Po návrhu DPS v programu Eagle, byl vytisknut laserovou tiskárnou na pauzovací papír motiv cest. Jedná se o desku s pozitivním fotorezistem, proto ta část, která bude osvícena bude následovně odplavena ve vývojce a ta část, která se světlem do styku nepřišla (cesty) zůstane. Motiv a DPS se k sobě přiloží a osvítí se v osvitovacím přístroji s UV trubnicemi na cca 80 s (záleží na druhu rezistu). Po osvitu se deska vloží do kádinky s vývojkou a po cca 15s se vyjme, pokud by byla ve vývojce příliš dlouho odplaví se i motiv cest. Dalším krokem je leptání. Deska se tedy vloží do kádinky s leptacím roztokem a nechá působit asi půl hodiny. Po vyleptání stačí desku omýt vodou a vložit znovu do vývojky, kde se odplaví zbytek rezistu, nebo použijeme ředidlo k odstranění rezistu. Po vyčištění a vysušení desky je na ni nanesen tenký film konformního laku ve formě spreje. Lak zároveň ochrání měděné cesty před oxidací. Motiv cest na pauzovacím papíru je na obr.4.2 a), výsledná DPS na obr.4.2 b).

4.1.1 Osazení DPS

Nejprve se osadí vícevývodové součástky jako jsou pouzdra DIL, SOIC. U testovací desky jsou to operační zesilovače, mikrokontrolér, převodník FTDI 232. Teprve pak se osadí SMD součástky a vývodové součástky s konektory.



Obr. 4.2: a) Motiv cest na pauzovacím papíru, b) DPS po osvitu, vyvolání, vyleptání

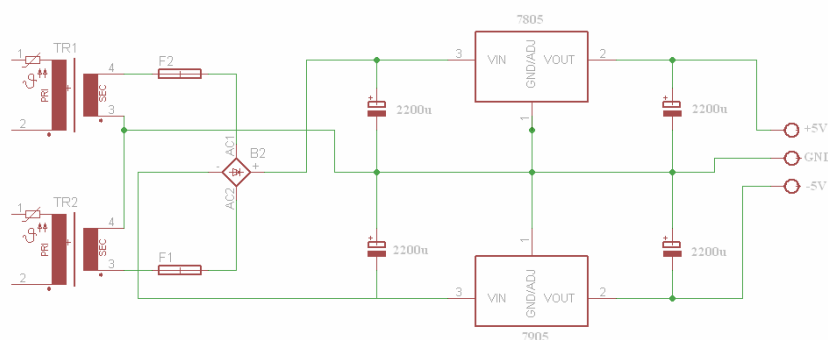


Obr. 4.3: Osazená testovací DPS

Deska je připojena na symetrické napájení $+5\text{ V}$, -5 V , 0 V . K napájení mi sloužil laboratorní zdroj Agilent. Aby bylo zařízení funkční i bez tohoto zdroje, vyrobil jsem samostatný napájecí symetrický zdroj. DPS byla zhotovena stejným způsobem jako v předešlém případě.

4.2 Zdroj

Stejným způsobem jako testovací desku jsem vyrobil i desku pro symetrický zdroj napětí. Je osazen dvěma transformátory $230\text{ V} / 7,5\text{ V}$, které mají spojeny krajní svorky sekundárního vinutí a tak je vytvořena zem GND. Zbývající svorky sekundárního vinutí transformátorů jsou připojeny na graetzův můstek, jeden pro kladnou větev napětí, druhý, pro zápornou větev. Dále jsou zde použity stabilizátory napětí 7805 a 7905. Elektrolytické kondenzátory pro odstranění zvlnění napětí. V příloze diplomové práce je vyobrazen hotový zdroj pro testovací desku na obr. 12.



Obr. 4.4: Zdroj symetrického napětí pro testovací desku

4.3 Výroba finální DPS

Po návrhu elektroniky ve schematicu programu Eagle, byla navržena oboustranná deska plošných spojů v části programu board. Layout desky (přední a zadní strana) je zobrazena v příloze diplomové práce obr. 14 a 15. Nebyla použita funkce autorouter, neboť zařízení je natolik složité, že program „vyrootoval“ přibližně jen 81% cest. Návrh desky byl proto vytvořen bez pomoci autorouteru.

Po návrhu oboustranné desky plošných spojů v programu Eagle 4.13. jsem vygeneroval gerber soubory. Poslal do firmy Pragoboard a nechal vyrobiť. Bylo nutné dodržet dané izolační mezery a šířky vodičů.

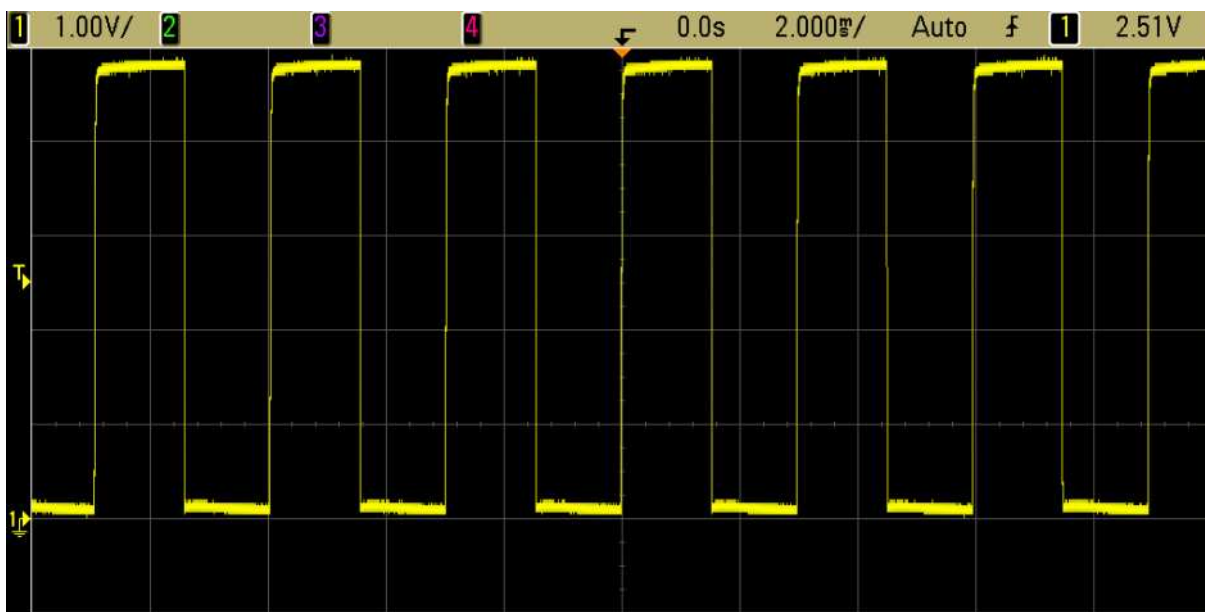
Finální desku jsem poté osadil součástkami a konektory. Nejprve se osazovali mnohavývodové SMD součástky (pouzdra SOIC, SOT, TQFP). V dalším kroku se osazovali SMD pasivní součástky a nakonec, vývodové součástky. Do krabičky je deska vložena tak, aby byly konektory dobře přístupné po uzavření plastové krabičky. Na zadní straně krabičky jsou umístěny pouzdra pro celkem 3 pojistky. Jedna na sekundární část transformátoru a dvě na primární část, z nichž jedna je určena pro kladnou větev napájení a druhá pro zápornou větev napájení. Konektory ve středu DPS vytvořené z lámací lišty slouží k připojení tlačítek a signalizačních diod na čelo krabičky. Celé zařízení je tedy v jednom celku, jen senzory jsou vyvedeny externě z krabičky přes konektor. Fotografie celého zařízení jsou v příloze diplomové práce.

4.4 Oživení finální DPS

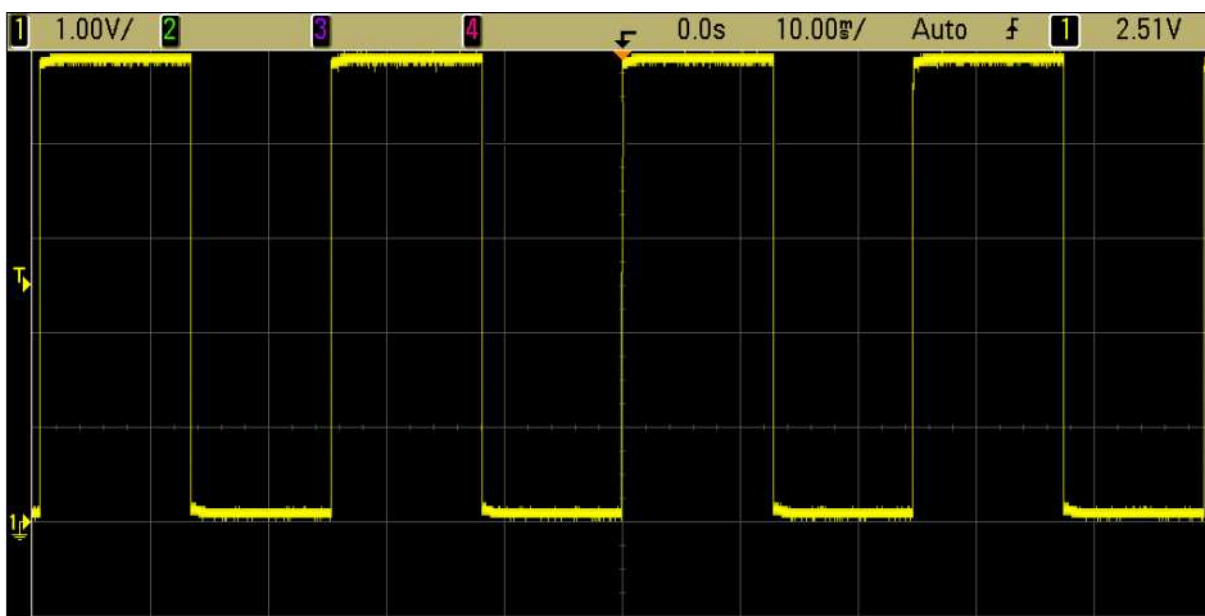
Nejdříve je nutné otestovat jednotlivé bloky obvodu samostatně, pomocí laboratorního zdroje s patřičným proudovým omezením, kdyby byla někde v obvodu zkratovaná cesta či součástka, tak se zdroj automaticky odpojí. Pokud všechny bloky fungují, zařízení se připojí do sítě a napájí se z vlastního zdroje symetrického napětí.

4.4.1 Oživení astabilního klopného obvodu

Po přivedení napájecího napětí na vodiče operačního zesilovače + 5 V a - 5 V, jsem připojil osciloskop na výstup generátoru až za tranzistorový spínač. Do zpětné vazby operačního zesilovače jsem připojil přes konektor senzoru proměnlivý odpor (potenciometr), ke zjištění změny závislosti změny frekvence na změně odporu senzoru. Měřením jsem zjistil, že průběhy na výstupu generátoru jsou dle očekávání a mají stejný poměr střídy a impulsu. Průběhy jsou zobrazeny na obr. 4.5 a 4.6. Jak je vidět z charakteristik frekvence se mění nepřímo úměrně v závislosti na změně odporu senzoru. Rozsah výstupní frekvence je od 40 Hz do 1,2 kHz.



Obr. 4.5: Charakteristika na výstupu AKO naměřená osciloskopem Agilent MSO6014A, na ose Y je napětí 1 V/dílek, na ose x čas 2 mV/dílek Odpor senzoru je v tomto případě 13k Ω . Frekvence je 316 Hz



Obr. 4.6: Charakteristika na výstupu AKO naměřená osciloskopem Agilent MSO6014A, na ose Y je napětí 1 V/dílek, na ose x čas 10 mV/dílek, Odpor senzoru je v tomto případě 100k Ω . Frekvence je 41 Hz

4.4.2 Zprovoznění mikrokontroléru

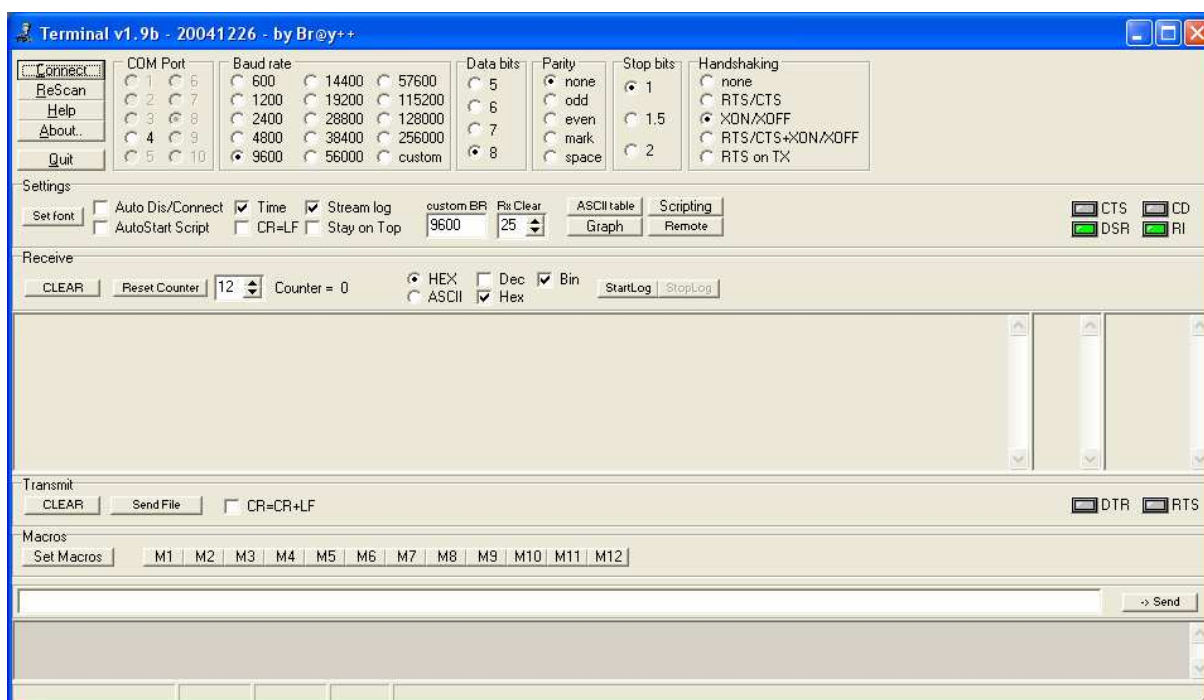
K obvodu je pomocí kabelu potřeba připojit programátor MPLAB, který je napájen externím zdrojem ss napětí 9 V a pomocí USB kabelu připojen k počítači. Programátor zároveň napájí obvod ss napětím 5V, není tedy potřeba použít zdroj napětí, který je součástí zařízení. V programu MPLAB IDE jsem vybral daný typ mikrokontroléru a nastavil

konfiguraci (výběr externího oscilátoru, vypnout watch dog timer atd.). Poté jsem otestoval komunikaci s mikrokontrolérem. Komunikace byla v pořádku. Vytvořil jsem jednoduchý program, kterým se testovaly vstupně výstupní porty, dalším programem se testoval A/D převodník. Vstupně výstupní porty byly testovány postupným rozsvěčováním diod, použití tlačítek k vypínání, nebo zapínání programu (svitu). Pro tento program bylo nutné inicializovat pouze PORTD pro diody, TRISD pro nastavení portu jako výstupu a registr ADCON1 pro nastavení digitálních vstupů.

4.4.3 Zprovoznění obvodu FTDI232 RL

Nejprve je nutné na počítač nainstalovat software, přesněji ovladače pro tento typ obvodu. Použil jsem ovladače VCP (Virtual COM Port), kde po nainstalování a připojení USB kabelu nastavíme parametry COM portu. Aby mohla aplikace komunikovat, musí se nastavit přenosová rychlost, číslo COM portu, paritu. Nastavení jsem provedl ve správci zařízení, v položce Porty je na konci řádku USB serial Port. Ve vlastnostech pak nastavím přenosovou rychlost 9600 bitů za sekundu, 8 datových bitů, bez parity, 1 stop bit. Potom lze vybrat číslo portu COM, se kterým bude software komunikovat.

Samotná komunikace s PC probíhá tak, že mikrokontrolér posílá bity prostřednictvím sériového rozhraní USART do integrovaného obvodu FTDI 232 RL. FTDI upraví napěťové úrovně potřebné ke komunikaci prostřednictvím USB. Nastavení a funkce UART u PIC16F877 je popsáno výše. FTDI pak posílá informace přímo do počítače. Bity zobrazují na PC pomocí programu Terminal v1.9b.



Obr. 4.7: Ukázka programu Terminal v1.9b

V horní části okna se konfiguruje přenosová rychlost, parita, číslo COM portu, stop bit. Pokud probíhá přenos ve střední části okna se zobrazují poslané bity.

4.4.4 Zprovoznění zdroje symetrického napětí

Po připojení síťového napětí 230 V, jsem proměřil napětí na sekundárním vinutí transformátoru, zda-li není někde přerušen vodič ze zadního panelu (z vypínače, nebo pojistek do desky). Potom jsem změřil napěťové úrovně na výstupu symetrického zdroje. Pro zjištění jestli nedochází ke zvlnění na výstupu zdroje (za stabilizátory napětí) jsem připojil osciloskop Agilent MSO6014A. Z průběhu. vyplynulo, že výstup je téměř bez zvlnění. Tímto je zdroj zprovozněn a oživen. Charakteristika je na obr. 4.8.



Obr. 4.8: Charakteristika zdroje symetrického napětí, měřeno mezi GND a +5V, kde na ose y je napětí 100 mV/dílek a na ose x čas 5 μ S/dílek .

4.5 Algoritmus

Na obr. 4.9 je zobrazen diagram programu. Jako první je nutné inicializovat porty a registry. Inicializovat jaké porty mají být vstupní a jaké výstupní. Dále pak inicializovat registry pro A/D převodník (ADCON0, ADCON1, ADRESH, ADRESL), registry pro nastavení I²C (SSPCON, SSPSTAT, SSPBUF, INTCON), registry pro nastavení USART

(TXSTA, RCSTA, SPBRG). Popis nastavení jednotlivých módů je popsán v kapitole 2.4 Mikrokontrolér.

Dalším blokem v diagramu programu je časová základna, ta řídí přepínání kanálů na analogovém přepínači 4066D pro přepínání jednotlivých senzorů na výstupu nestabilního klopného obvodu. Dále slouží k přepínání kanálů druhého analogového přepínače pro přepínání výstupu D/A převodníku na vstupy diferenčních zesilovačů. Časová základna je určena pro přepínání A/D vstupů, mikrokontrolér má sice 8 A/D vstupních kanálů, ale číst dokáže vždy jen z jednoho.

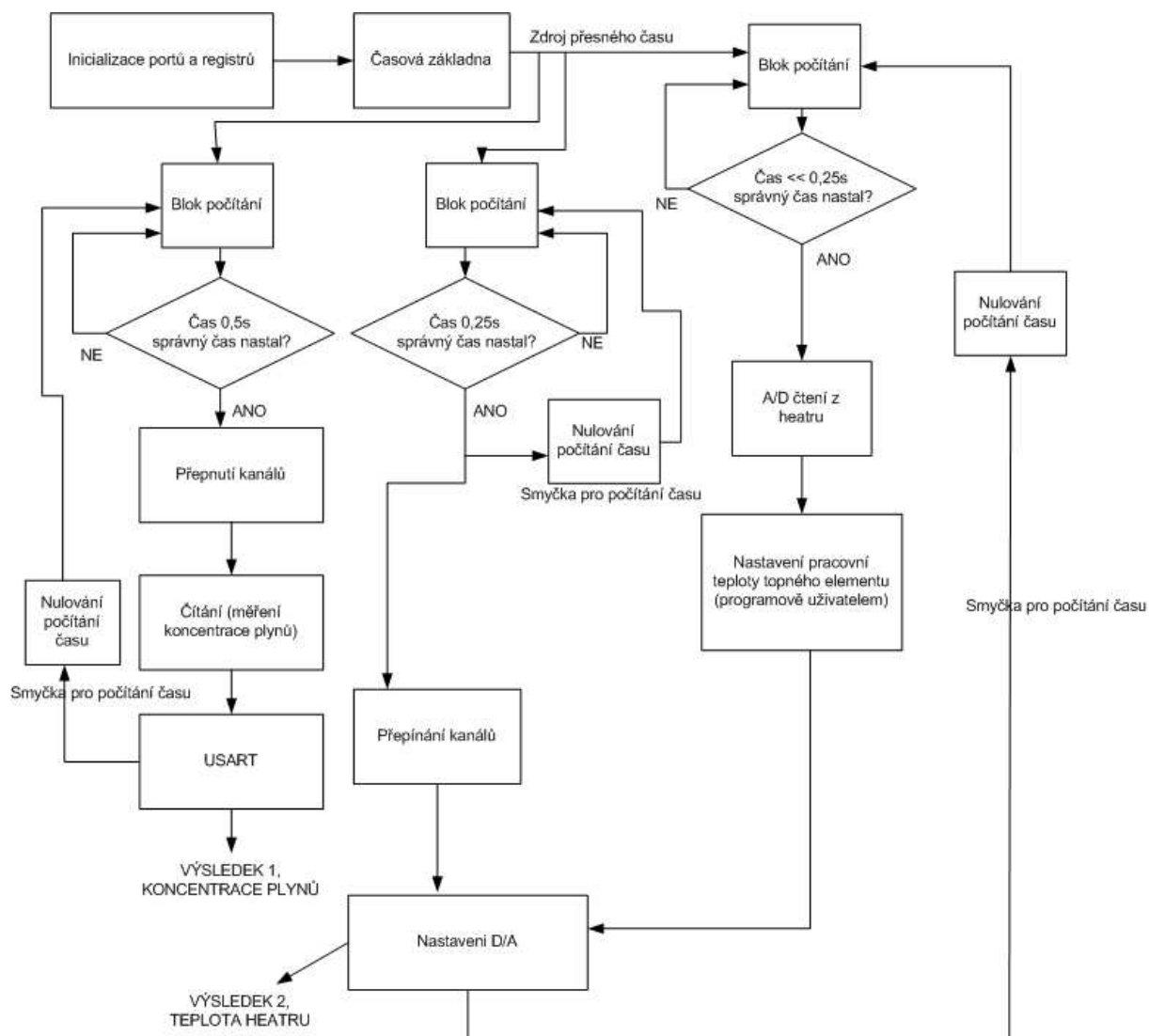
Když nastane správný čas, tak se přejde na vlastní program a zároveň se vynuluje čítání času, aby za určitou periodu mohlo dojít k dalšímu opakování

Nyní se zaměříme na popis snímání koncentrace plynů a posílání dat do počítače. Jak již bylo zmíněno výše, měření je prováděno na čtyřech senzorech, jelikož je čítán jedním vstupem, je zapotřebí je přepínat po určitém čase. Pokud je hodnota času pod 0,5 s vyhodnotí se záporně a vrátí se zpět do smyčky, pokud je čas 0,5 s přepne mikrokontrolér další kanál (další senzor). V tomto časovém intervalu probíhá měření (čítání frekvence). Výsledek se pošle přes sériovou linku USART do počítače.

Pak proběhne vynulování času a vrátí se do bloku počítání, kde navazuje znova podmínka času. Další část je vyhřívání topného elementu. Zde opět podmínka (kontrola času), musí být menší než 0,25 s, protože přečtení analogové hodnoty bude probíhat několikrát během jednotlivého přepínání výstupu D/A převodníku.

Pokud je tedy čas menší než 0,25 s, vyhodnotí se podmínka kladně a postupuje do dalšího bloku, pokud ne vrací se na začátek smyčky do bloku počítání.

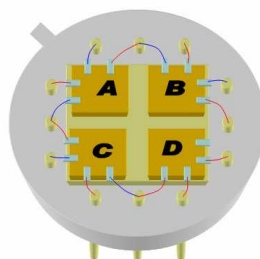
Dalším blokem je čtení analogového signálu (teploty) z topného elementu. Programově je přednastavena teplota, na kterou se má senzor vyhřát. Poté podle programově přednastavené hodnoty teploty se zvýší nebo sníží napětí na výstupu D/A převodníku. Výsledkem z bloku nastavení D/A je nastavení teploty topného elementu. Do tohoto bloku je rovněž přivedeno přepínání kanálů po 0,25 s.



Obr. 4.9: Algoritmus programu zařízení

4.6 Měření na senzoru

Bylo provedeno několik měření, pro zjištění odporu topného elementu a elektrod. Výsledky měření jsem zde uvedl pro 3 senzory. Při pokojové teplotě (když senzor není vyhříván) je odpor na elektrodách řádově v $M\Omega$. Po vyhřátí senzoru na pracovní teplotu odpor na elektrodách klesne na stovky Ω až sto $k\Omega$.



Obr. 4.10: Zobrazený čip se čtyřmi senzory plynů

Tab. 4.1: Naměřené hodnoty na senzoru bez použití vytápění a při pokojové teplotě 23°C

č.	Senzor na čipu č.	Heater	Elektrody
1	A	565 Ω	12,13 $M\Omega$
	B	563 Ω	19,53 $M\Omega$
	C	567 Ω	5,21 $M\Omega$
	D	569 Ω	15,23 $M\Omega$
2	A	681 Ω	11,1 $M\Omega$
	B	580 Ω	15,42 $M\Omega$
	C	598 Ω	13,81 $M\Omega$
	D	638 Ω	14,2 $M\Omega$
3	A	590 Ω	13,43 $M\Omega$
	B	543 Ω	19 $M\Omega$
	C	603 Ω	9,41 $M\Omega$
	D	552 Ω	16,22 $M\Omega$

5 Závěr

Cílem diplomové práce s názvem Elektronický detektor pro tenkovrstvé mikrosenzory plynů bylo nastudovat tematiku tenkovrstvých elektrochemických senzorů plynů na bázi polovodivých kovů. Dále navrhnout elektronické řízení pro tyto senzory a realizovat zařízení v technologii SMT.

V druhé kapitole diplomové práce je zpracována problematika tenkovrstvých a tlustovrstvých senzorů včetně senzoru použitého ve výsledném zařízení. Dále je popsán výběr a popis jednotlivých součástí pro zařízení včetně použitého mikrokontroléru Microchip PIC 16F877.

Nejdříve byly jednotlivé části zařízení podrobeny simulacím v programu OrCad Capture, poté byl vytvořen návrh ve schematicu softwaru Eagle 4.13. Byla vytvořena testovací deska pro jeden senzor, dále deska se symetrickým zdrojem napětí, pro napájení testovací desky. Finální desku zařízení jsem nechal vyrobit ve firmě Pragoboard s.r.o., jedná se o oboustrannou desku plošných spojů s prokovenými otvory (bezolovnatý HAL) a nepájivou maskou. Po osazení desky následovalo ožívování zařízení. Nejdříve bylo nutné oživit jednotlivé části zvlášť. Jednotlivé bloky pro snímání odporu senzoru, regulace teploty, mikrokontrolér a převodník USB FTDI 232 RL. V kapitole 4.4 je zobrazen algoritmus programu pro zařízení. V přílohách jsou schémata zařízení spolu s layoutem desky. Dále je přiložen testovací program.

Elektronika je vložena do plastové krabičky, ke které se připojí síťový kabel pro napájení obvodu, senzor, programátor a USB kabel.

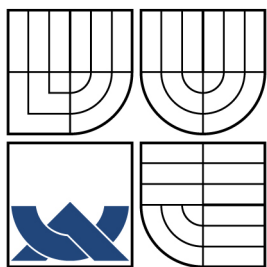
Výsledky měření jsou přiloženy na obr. 4.5 a 4.6, kde lze vidět jak se mění frekvence v závislosti změny odporu na senzoru.

Dle zadání jsem navrhl a zrealizoval elektroniku pro řízení 4 tenkovrstvých senzorů plynů, komunikace s počítačem je zabezpečena prostřednictvím sériové linky USART a převodníku USB FTDI 232 RL, do počítače je nutné nahrát příslušné ovladače a program Terminal v1.9b. Bohužel se mi nepodařilo celkově zprovoznit zařízení po softwarové stránce.

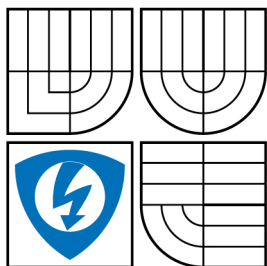
6 Seznam použitých zdrojů

- [1] HUBÁLEK, Jaromír, ADÁMEK, Martin. Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy. 2004. 105 s.
- [2] PIC16F87X Data Sheet [online]. 2008 [cit. 2009-03-01]. Dostupný z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30292c.pdf>>.
- [3] MATOUŠEK, D. USB prakticky s obvody FTDI – 1.díl. Praha 2003. 258 stran. ISBN 80-7300-103-9.
- [4] Implementace I2C komunikace ve VHDL [online]. 2009 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.samples.cz/clanky/implementace-i2c-komunikace-ve-vhdl/>>.
- [5] Using the I2C Bus [online]. 2008 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <http://www.robot-electronics.co.uk/htm/using_the_i2c_bus.htm>.
- [6] Microchip TB3009 [online]. 2008 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/93009A.pdf?from=rss>>.
- [7] Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC [online]. 2008 [cit. 2009-04-03]. Dostupný z WWW: <http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R.pdf>.
- [8] Chemické senzory [online]. 2008 [cit. 2009-04-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/kulha/X34SES+SEE/chemicke%20senzory.ppt>>.
- [9] Perspektivy chemických vodivostních senzorů [online]. 2008 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28813>.
- [10] Detekce plynů a par pomocí připravených vodivostních senzorů [online]. 2008 [cit. 2008-05-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/vrnatam/docs2/Detekce%20plynu%20a%20par.pdf>>.
- [11] Popis procesoru PIC16F873, 874, 876 a 877 [online]. 2008 [cit. 2009-05-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.cmail.cz/doveda/procesory/pic16f87x/index.htm>>.
- [12] PUNČOCHÁŘ, Josef. Operační zesilovače v elektronice, 2002. 496 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [13] TL081, TL081A, TL081B, TL082, TL082A, TL082B [online]. 2009 [cit. 2009-02-02]. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/tl084.pdf>>.
- [14] SN74AHC4066 QUADRUPLE BILATERAL ANALOG SWITCH [online]. 2003 [cit. 2009-03-03]. Dostupný z WWW: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/100134/TI/SN74AHC4066D.html>>.

- [15] *Komerční senzory plynů a jejich testování [online]. 2008 [cit. 2008-05-02].*
Dostupný z WWW:
<<http://www.vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/vrnatam/docs2/testy%20komerčních%20senzorů.pdf>>.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY



FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

PŘÍLOHY

ELEKTRONICKÝ DETEKTOR PRO TENKOVrstvé MIKROSENZORY PLYNŮ ELECTRONIC DETECTOR FOR THIN-FILM GAS MICROSENSORS

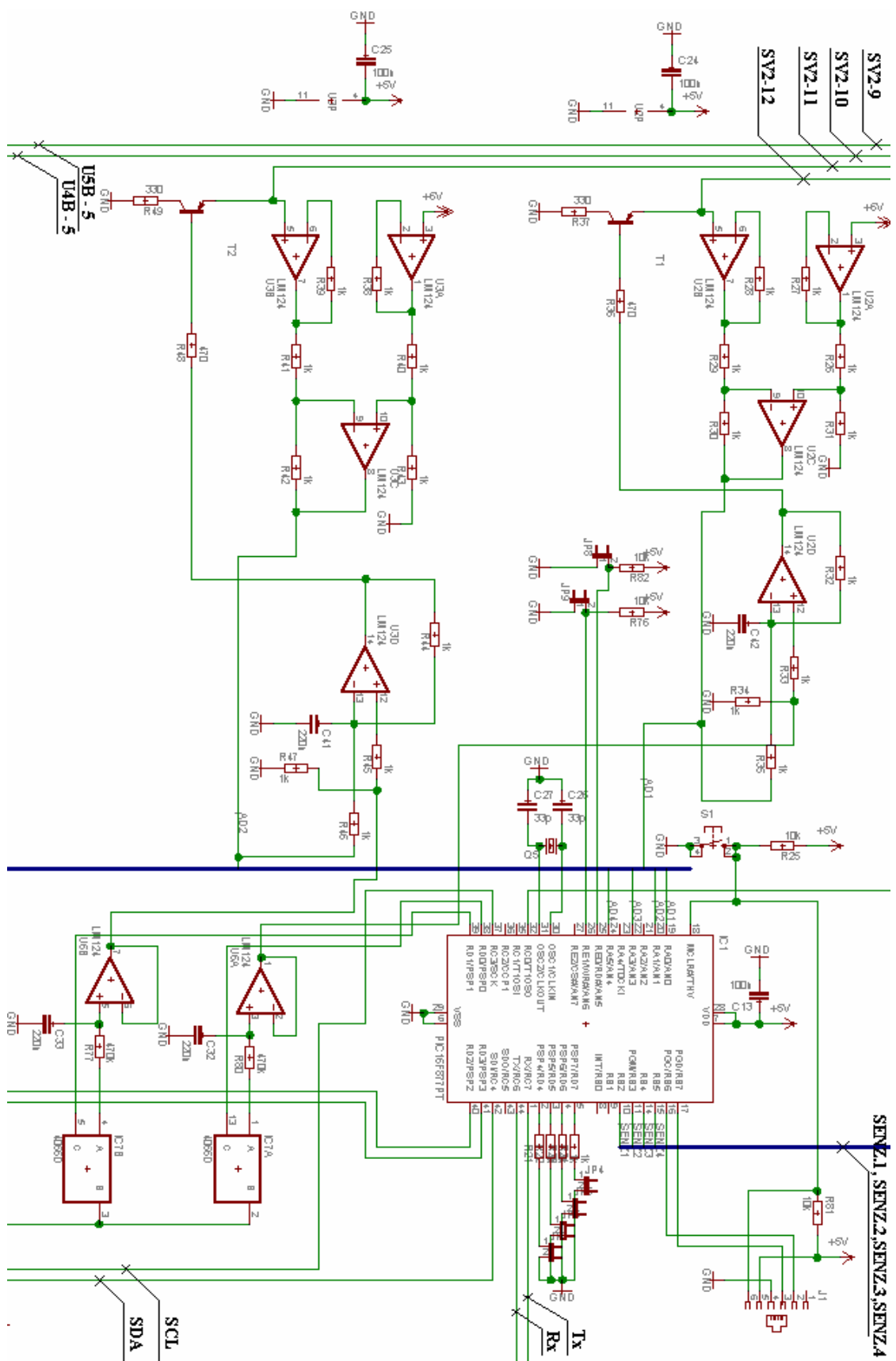
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

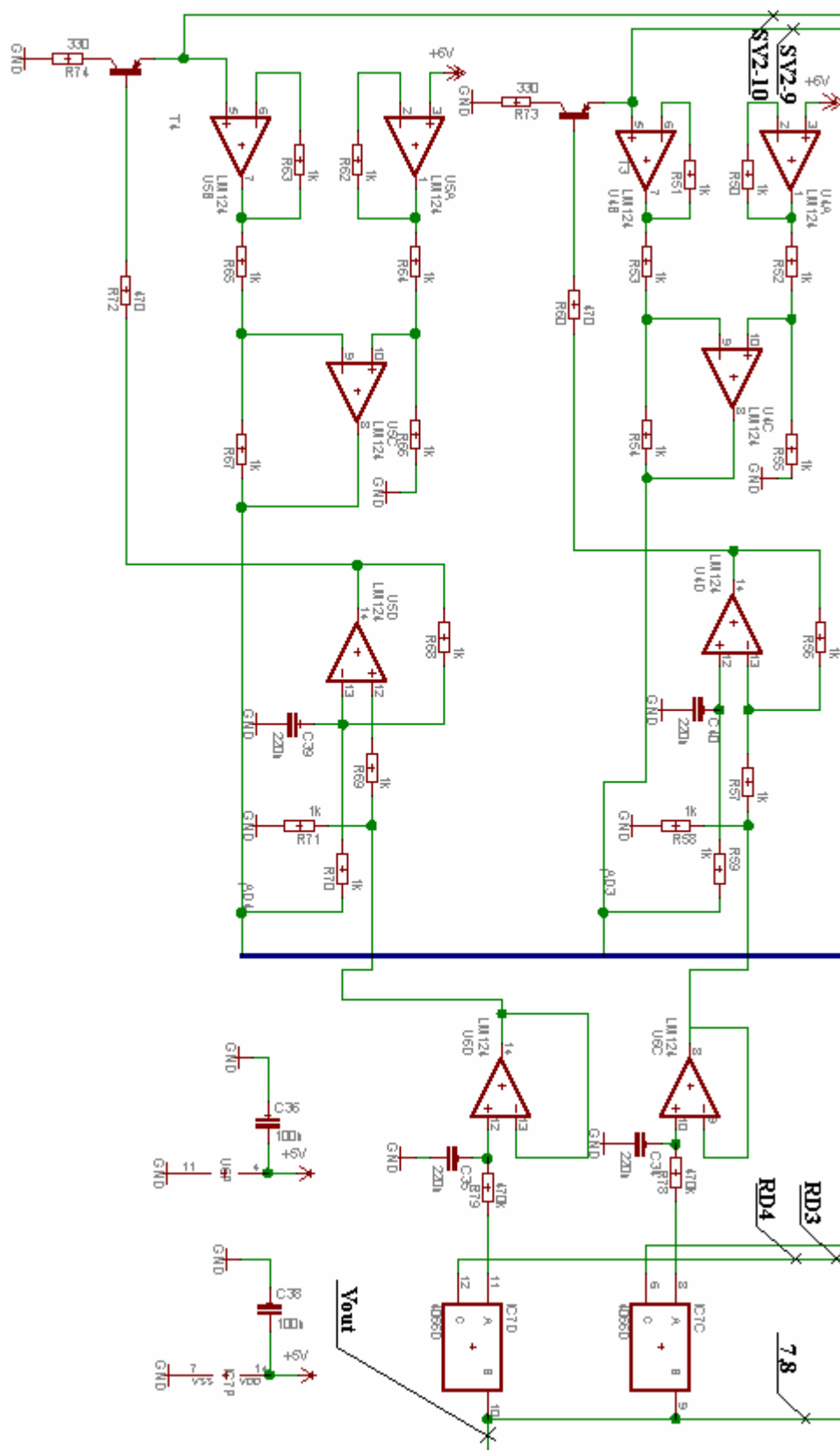
Bc. JAKUB ROZŠTÍPIL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

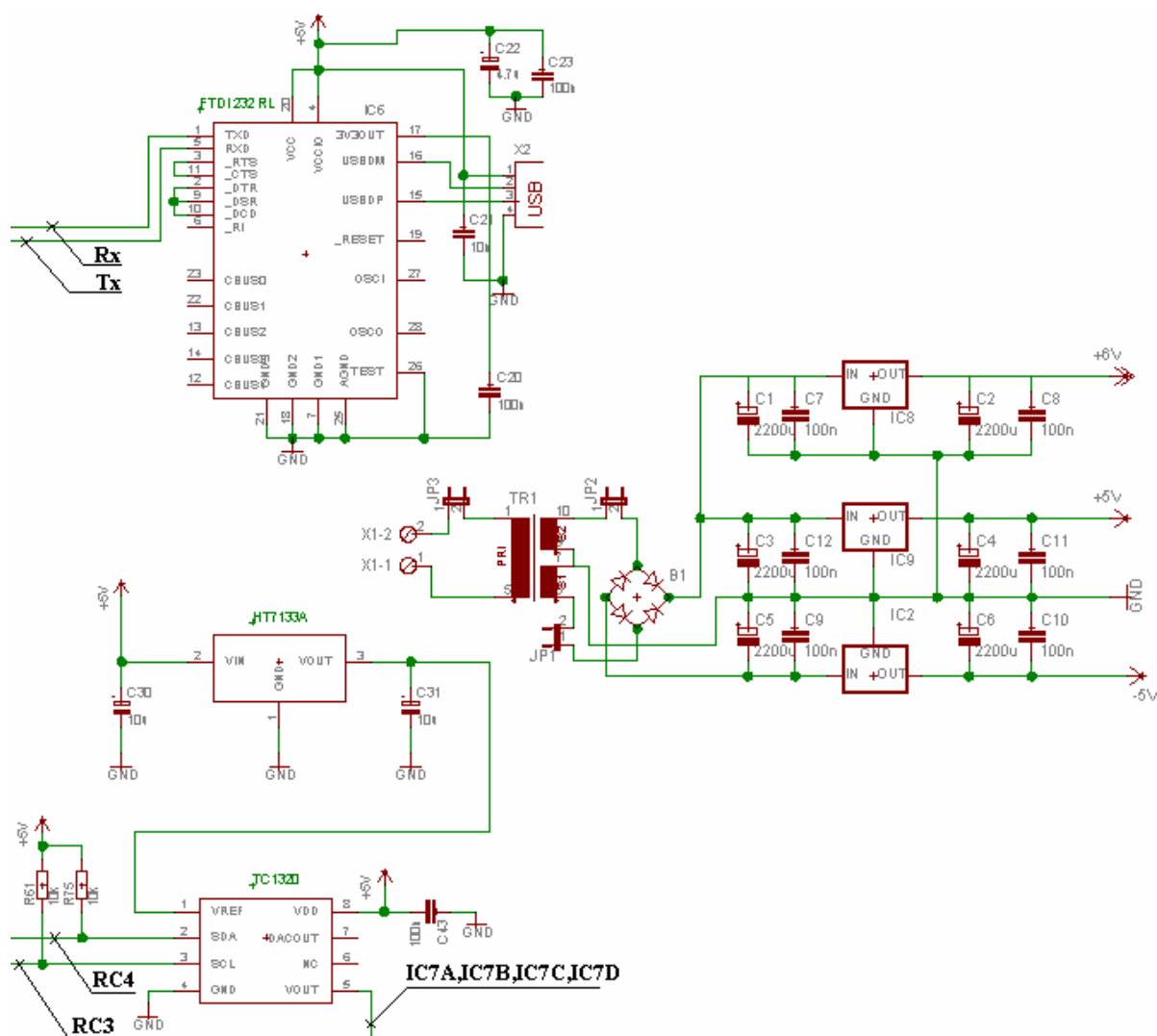
doc.Ing.Jaromír Hubálek,Ph.D.



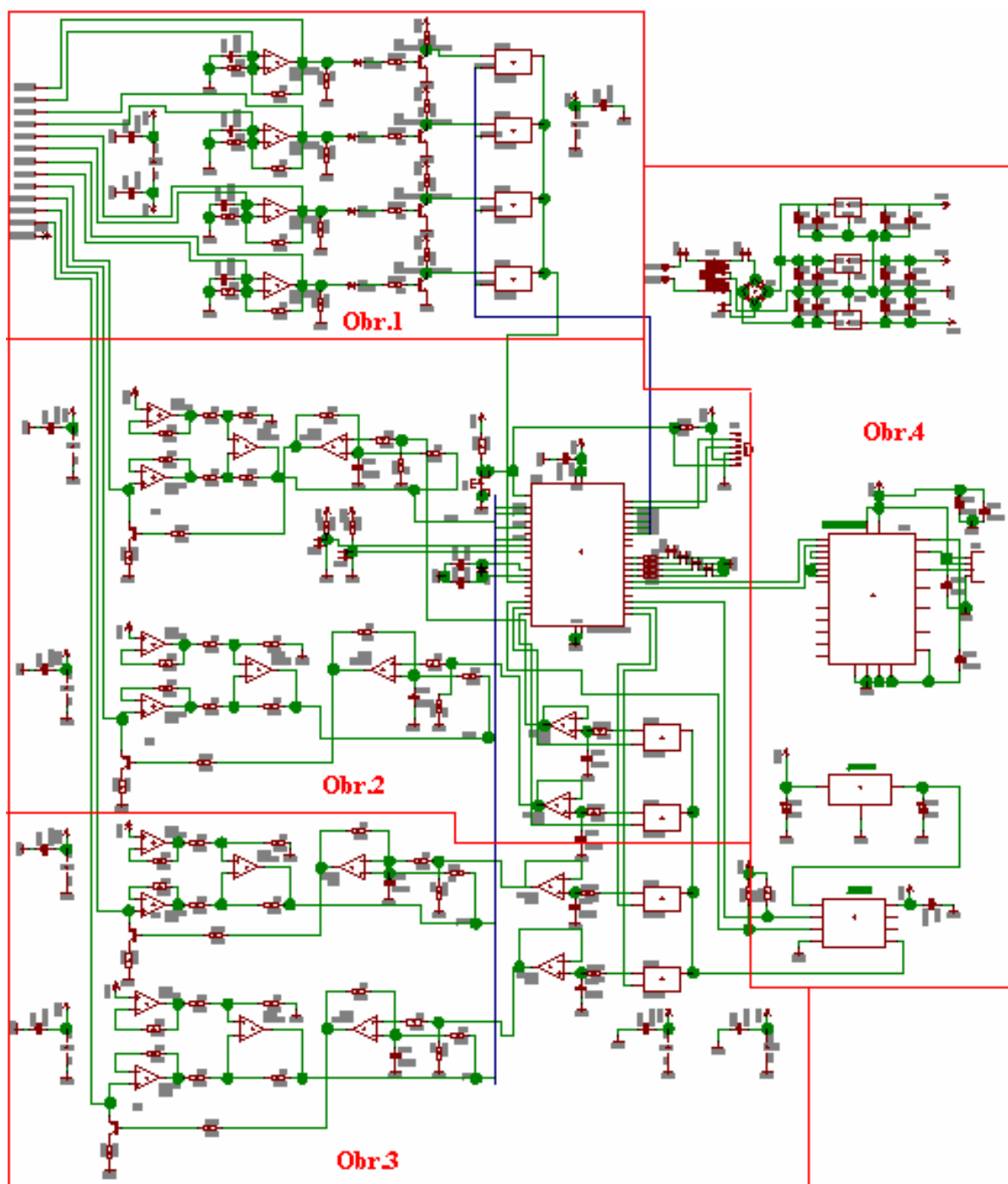
Obr. 2: Schéma obvodů pro řízení vytápění senzoru 1 a 2, zapojení mikrokontroléru



Obr. 3: Schéma obvodů pro řízení vytápění senzoru 3 a 4



Obr. 4 Schéma D/A převodníku TC1320, napěťové reference HT7133A, FTDI232 RL, symetrického zdroje napětí



Obr. 5 Schéma celého zařízení s označením rozdělení jednotlivých částí viz. předchozí schémata



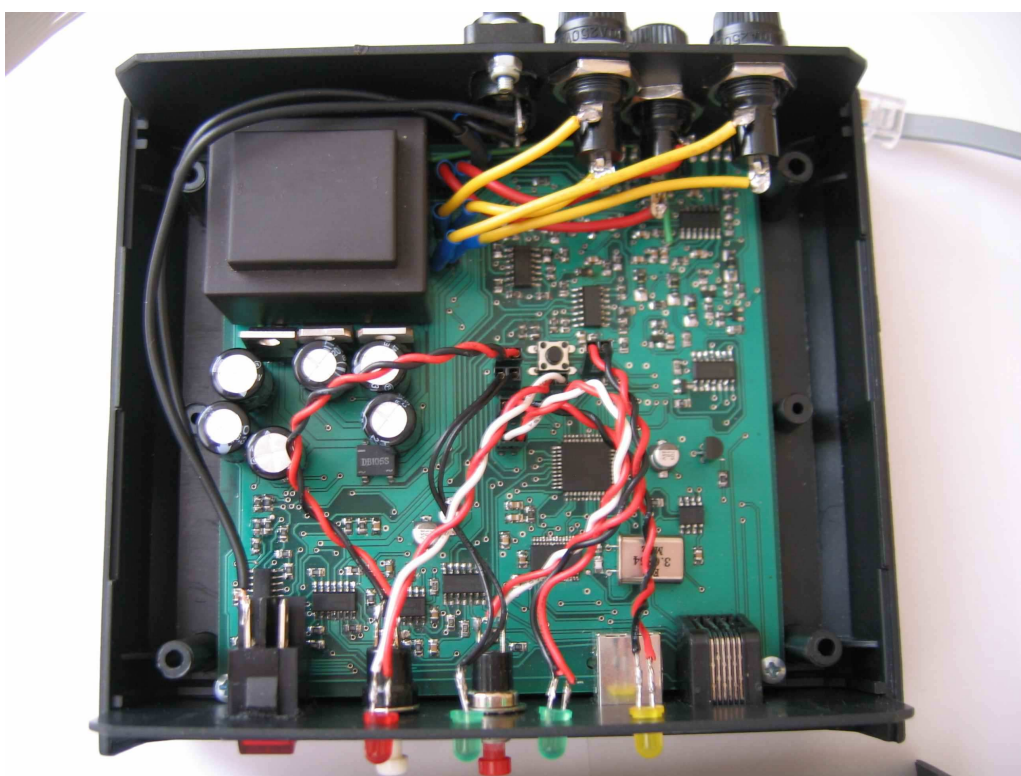
Obr. 6: Pohled na finální desku plošných spojů osazenou v krabičce, ke které je připojen programátor napájecí kabel a senzor plynů



Obr. 7: Přední pohled na krabičku s osazenou DPS



Obr. 8: Zadní panel zařízení



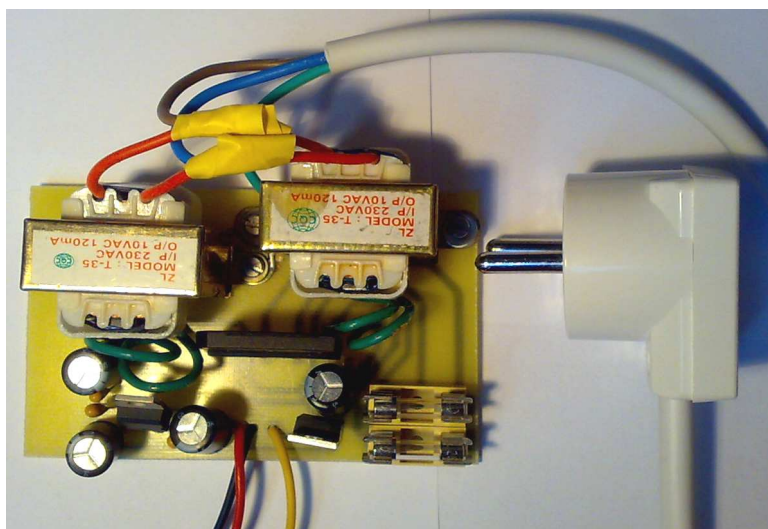
Obr. 9: Pohled na osazenou DPS finálního výrobku



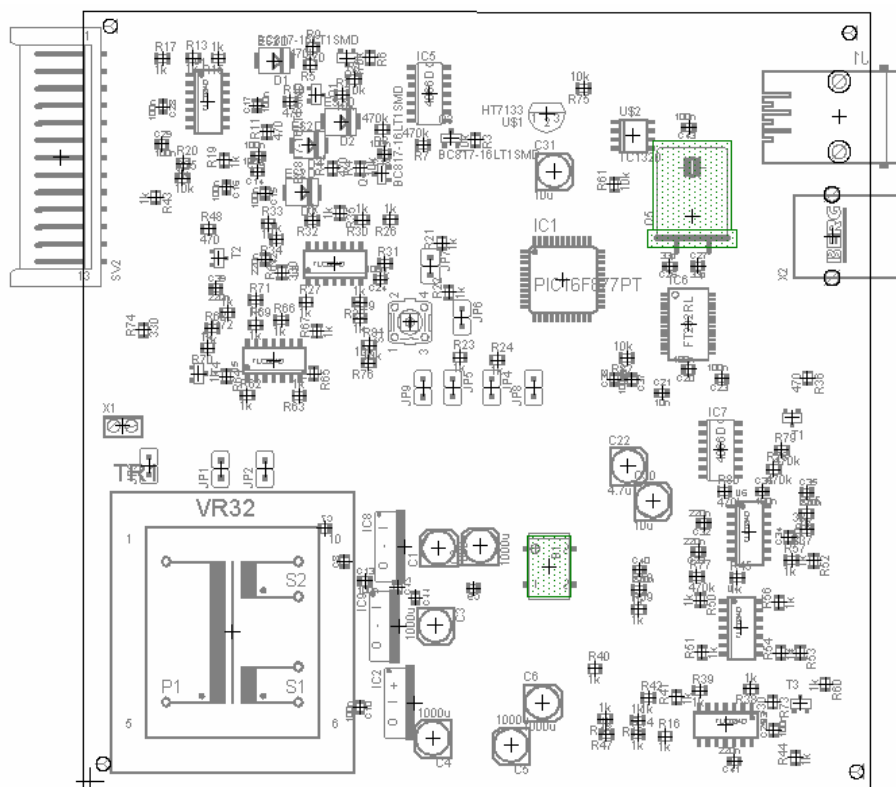
Obr. 10: Redukce pro připojení senzoru plynů do DPS, pohled na senzor



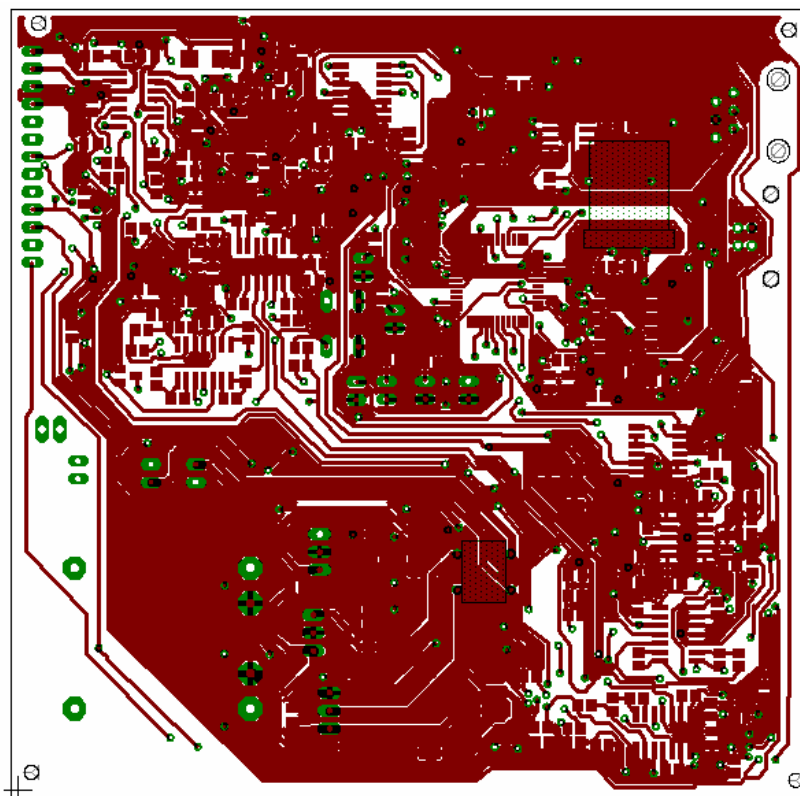
Obr. 11: Redukce pro připojení senzoru plynů do DPS, pohled na senzor bez ochranného krytu



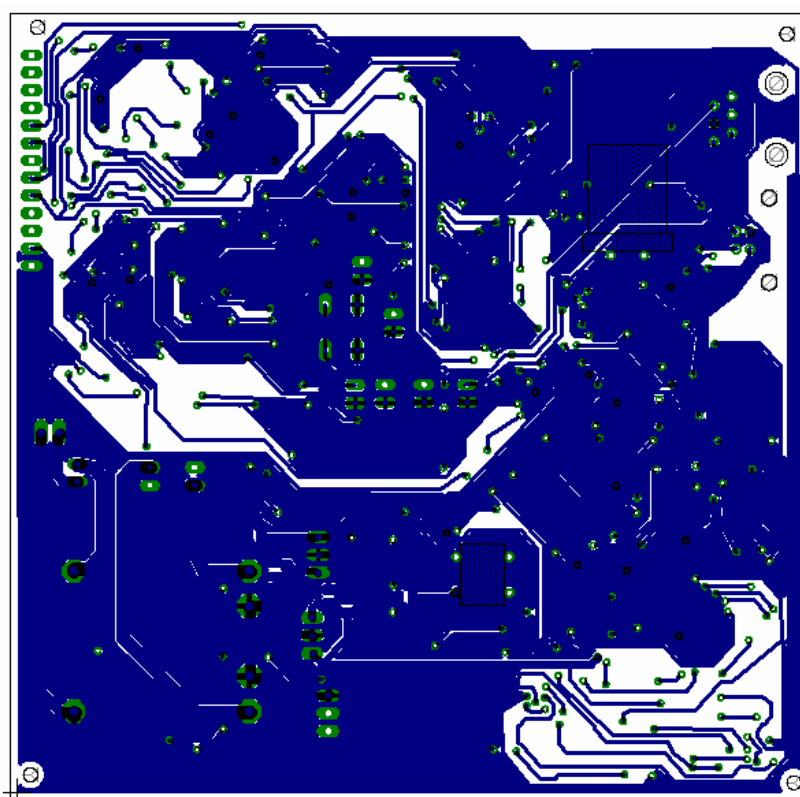
Obr. 12: Zdroj symetrického napětí +5 V,-5 V, 0 V, pro testovací DPS



Obr. 13: Pohled na součástky osazené DPS, vygenerované programem Eagle 4.13.



Obr. 14: Pohled na vrstvu top finální DPS, vytvořenou programem Eeagle 4.13.



Obr. 15: Pohled na vrstvu bottom finální DPS, vytvořenou programem Eeagle 4.13.