



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vyhodnocovací jednotka pro multisenzorový modul

Autor práce: Bc. Jiří Janata
Vedoucí práce: Ing. Jiří Čengery, Ph.D.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří JANATA**
Osobní číslo: **E14N0081P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Vyhodnocovací jednotka pro multisenzorový modul**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Návrh a realizace řídicí a vyhodnocovací jednotky pro moduly plynů.

1. Popište typy a principy měření senzorů plynů, které budou použity.
2. Seznamte se se stávajícím prototypem HW a naprogramujte firmware pro komunikaci s danými senzorovými moduly a nadřazenou komunikační jednotkou.
3. Navrhněte změny a vylepšení stávajícího HW a realizujte je.
4. Naprogramujte firmware pro kalibraci jednotlivých senzorů plynů.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

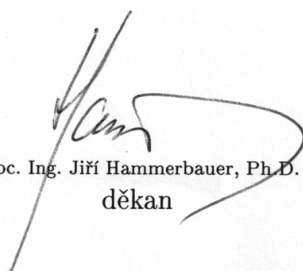
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

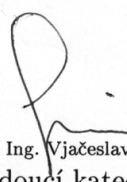
- 1. dokumentace pro mikroprocesory ST**
- 2. dokumentace senzorů plynů (dodané vedoucím)**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Čengery, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato práce se zabývá objasněním principů senzorů pro měření koncentrací daných plynů. Dále je zde uveden návrh a realizace vyhodnocovací jednotky a měřících modulů. Další částí práce je návrh programu pro vyhodnocovací jednotku, který obstarává komunikaci s měřícími moduly, komunikaci s nadřazenou jednotkou, komunikaci s PC aplikací a samotné vyhodnocování koncentrací. Poslední část práce je věnována PC aplikaci, která zajišťuje kalibraci měřících modulů.

Klíčová slova

elektrochemický senzor, katalytický senzor, kalibrace senzorů plynů

Abstract

Janata, Jiří. *Evaluation unit for multisensors module [Vyhodnocovací jednotka pro multisenzorový modul]*. Pilsen, 2016. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Čengery

This thesis describes principles of gas sensors, design and realization of evaluation unit and measuring modules. Other part of the thesis shows code for the evaluation unit. This code provides communication with measuring modules, communication with master unit, communication with PC and evaluation of gas concentration. The last part describes application for calibration modules.

Keywords

electrochemical sensor, catalytic sensor, calibration of gas sensors

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 10. května 2016

Bc. Jiří Janata

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Jiřímu Čengerymu, Ph.D. za vedení diplomové práce a cenné diskuze.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratek	x
1 Úvod	1
2 Senzory plynů	2
2.1 Základní principy senzorů pro měření koncentrace plynů	2
2.1.1 Popis elektrochemického principu	2
2.1.2 Popis katalytického principu	5
2.2 Mezní koncentrace plynů	6
3 Prototyp vyhodnocovací jednotky a komunikace se senzorovými moduly	7
3.1 Principiální řešení vyhodnocovací jednotky	7
3.2 Měřicí moduly	9
3.2.1 Měření koncentrace katalytickým senzorem	10
3.2.2 Měření koncentrace elektrochemickým senzorem	10
3.3 Výpočty pro nastavení měřících modulů	11
3.3.1 Měření metanu	11
3.3.2 Měření oxidu uhelnatého	12
3.3.3 Měření amoniaku	13
3.3.4 Měření oxidu dusičitého	13
4 Návrh programu pro komunikaci s měřícími moduly a nadřazenou jednotkou	15
4.1 Start programu	15
4.2 Měřicí smyčka	16
4.3 Komunikace jednotky s PC	16
4.4 Komunikace s nadřazenou jednotkou	19
4.5 Kalibrace měřících modulů	19

5	Vlastní návrh vyhodnocovací jednotky a měřících modulů, program pro vyhodnocení a komunikaci s PC	23
5.1	Návrh vyhodnocovací jednotky	23
5.2	Návrh měřících modulů	28
5.2.1	Měřící modul pro elektrochemický senzor	28
5.2.2	Měřící modul pro katalytický senzor	29
5.3	Program pro vyhodnocovací jednotku	31
6	Program pro kalibraci měřících modulů	35
6.1	Návrh programu pro kalibraci a nastavení měřících modulů	35
6.2	Komunikace programu s vyhodnocovací jednotkou	37
6.3	Otestování kalibračního programu	39
7	Závěr	42
	Reference, použitá literatura	44
	Přílohy	46
A	Schémata zapojení - prototypy	46
B	Schémata zapojení - nové návrhy	53

Seznam obrázků

2.1	Schéma elektrochemického senzoru [Převzat z [6]]	3
2.2	Elektrochemický senzor Alphasense pro měření koncentrace oxidu uhelnatého	4
2.3	Výstup senzoru v závislosti na změně teploty [Převzat z [9]]	4
2.4	Citlivost senzoru v závislosti na změně teploty [Převzat z [9]]	5
2.5	Katalytický senzor Alphasense pro měření koncentrace metanu	5
3.1	Blokové schéma vyhodnocovací části jednotky	8
3.2	Typické zapojení LMP91000 pro 3-vývodový elektrochemický senzor [Převzat z [8]]	10
4.1	Vývojový diagram programu	16
4.2	Ukázka výpisu obsazení konektorů a EEPROM dat	18
4.3	Datový rámec pro zápis dat do EEPROM	18
4.4	Časový průběh hodnot A/D konverze v závislosti na koncentraci plynu CO	21
4.5	Kalibrační křivka a její linearizace měřicího modulu pro plyn CO	22
5.1	3D model vyhodnocovací jednotky - strana TOP	24
5.2	3D model vyhodnocovací jednotky - strana BOTTOM	24
5.3	Blokové schéma vyhodnocovací jednotky	25
5.4	Typické zapojení obvodu MCP73837	27
5.5	3D model komunikační jednotky - strana TOP	28
5.6	3D model komunikační jednotky - strana BOTTOM	28
5.7	3D model měřicího modulu pro elektrochemický senzor - strana TOP	29
5.8	3D model měřicího modulu pro elektrochemický senzor - strana BOTTOM	30
5.9	3D model měřicího modulu pro katalický senzor - strana TOP	31
5.10	3D model měřicího modulu pro katalický senzor - strana BOTTOM	31
5.11	Vývojový diagram programu	32
6.1	Ukázka kalibračního programu před otevření komunikační linky	36
6.2	Ukázka kalibračního programu se zasunutými měřicími moduly	37
6.3	Struktura datového rámce - požadavek (příkaz) ze strany kalibračního programu	38

6.4	Struktura datového rámce - data pro čtení nebo zápis z/do EEPROM paměti měřicího modulu	38
6.5	Struktura datového rámce - hodnota A/D konverze a vypočítané koncentrace	39
6.6	Časový průběh A/D konverzí nového senzoru	40
6.7	Časový průběh A/D konverzí dvou měřících modulů při nulové koncentraci	40
6.8	Časový průběh kalibrace měřicího modulu	40
A.1	Blokové schéma vyhodnocovací jednotky	47
A.2	PW Managment	48
A.3	MCU	49
A.4	Sensor	50
A.5	Schéma měřicího modulu pro měření katalytickým senzorem	51
A.6	Schéma měřicího modulu pro měření elektrochemickým senzorem	52
B.1	Blokové schéma vyhodnocovací jednotky	54
B.2	PowerManagment	55
B.3	MCU	56
B.4	Connectors	57
B.5	Bluetooth	57
B.6	Schéma měřicího modulu pro měření katalytickým senzorem	58
B.7	Schéma měřicího modulu pro měření elektrochemickým senzorem	59
B.8	Schéma nadřazené komunikační jednotky	60

Seznam tabulek

2.1	Přehled parametrů senzoru CO-AX Převzato z [9] 	4
2.2	Přehled parametrů senzoru CH-A3 Převzato z [10] 	6
2.3	Přehled měřených plynů a jejich mezních koncentrací ve vnitřních prosto- rách budov	6
3.1	Přehled parametrů STM32F051C6T6	8
3.2	Přehled parametrů BQ24032A	9
3.3	Přehled parametrů MCP1825S-330E/DB	9
3.4	Přehled parametrů senzoru CH-A3 Převzato z [10] 	11
3.5	Přehled parametrů senzoru CO-AX Převzato z [9] 	12
3.6	Přehled parametrů senzoru NH3 500 SE Převzato z [16] 	13
3.7	Přehled parametrů senzoru NO2-A1 Převzato z [13] 	14
4.1	Přehled uložených dat v paměti EEPROM	17
4.2	Inicializace komunikace	19
4.3	Souhrn servisních zpráv	20
4.4	Souhrn datových zpráv	20
4.5	Ustálené hodnoty A/D konverze odpovídající dané koncentraci plynu . . .	21
5.1	Přehled dostupných MCU na Farnell	26
5.2	Přehled parametrů STM32F072CBT6	26
5.3	Přehled parametrů MCP73837	27
5.4	Adresace obvodů na sběrnici I2C	29
5.5	Přehled parametrů senzoru CO-A4 pro měření koncentrace plynu CO v ppb [15]	30
5.6	Přehled uložených dat v paměti EEPROM	34
6.1	Přehled identifikátorů zpráv	38
6.2	Identifikace měřícího modulu	39
6.3	Hodnoty nastavených koncentrací plynu CO pro kalibraci měřících modulů	41

Seznam symbolů a zkratek

CRC	Cyclic Redundancy Check. Cyklický redundantní součet.
EMC	Electromagnetic Compatibility. Elektromagnetická kompatibilita.
EMI	Electromagnetic Interference. Elektromagnetická interference.
ESD	Electrostatic Discharge. Elektrostatický výboj.
$G[-]$	Zesílení.
$GF[l/min]$	Gas Flow. Průtok plynu.
HSI	High Speed Internal oscillator. Vnitřní oscilátor.
I2C	Inter-Integrated Circuit. Dvoudrátové rozhraní.
$I_{1ppm}[nA/ppm]$	Citlivost senzoru na 1 ppm koncentrace.
$I_{max}[A]$	Maximální proud tekoucí senzorem.
$K_{max}[%]$	Maximální měřená koncentrace.
LEL	Lower Explosive Limit. Mez výbušnosti.
MCU	Microcontroller Unit. Mikrokontrolér.
ppb	Parts per million. .
ppm	Parts per million. .
$RH[%]$	Relative Humidity. Relativní vlhkost.
$U_{1\%}[mV/\%]$	Citlivost senzoru na 1 % koncentrace.
$U_{intzero}[V]$	Vnitřní nula obvodu LMP91000.
$U_{max}[V]$	Maximální výstupní napětí na výstupu senzoru.
$U_{offset}[V]$	Napěťový offset.
USB	Universal Serial Bus. Univerzální sériová sběrnice.

1

Úvod

V úvodu této práce je popsán princip senzorů pro měření koncentrace plynů, které byly použity. Dle zadání byl požadavek měřit a vyhodnocovat koncentraci oxidu uhelnatého, metanu, amoniaku a oxidu dusičitého. Později byl požadavek navýšen ještě o měření koncentrace oxidu siřičitého. Pro měření koncentrace těchto plynů byly vybrány senzory, kde se uplatňují dva typy principů senzorů. Respektive je zde vysvětlen princip senzoru elektrochemického a senzoru katalytického. Dále jsou zde uvedeny příklady skutečných senzorů obou typů, tzn. jsou uvedeny jejich základní vlastnosti, výhody a nevýhody.

Poté je popsán prototyp vyhodnocovací jednotky, která vznikla z předešlého vývoje na katedře technologií a měření. V této části jsou také uvedeny výpočty, které souvisí s měřením koncentrace a nastavením podpůrné měřicí elektroniky pro jednotlivé měřicí moduly. Další část práce se zabývá návrhem programu pro měření a vyhodnocení koncentrace plynů. Program řeší komunikaci s měřicími moduly, jejich nastavení a vyčítání naměřených hodnot. Dále obsahuje část pro komunikaci s nadřazenou jednotkou. Pomocí této komunikační jednotky jsou předávány data k dalšímu zpracování.

Následuje návrh a realizace vlastního řešení vyhodnocovací jednotky a měřících modulů. Zde byly provedeny změny a vylepšení oproti předchozí verzi vyhodnocovací jednotky. Při návrhu změn byl kladen důraz zejména na přímou komunikaci vyhodnocovací jednotky s PC přes USB a možnost kalibrace více měřících modulů najednou. Nový návrh měřících modulů byl nutný zejména z důvodu použití citlivějších senzorů a nového principu adresace (I2C) obvodů v měřících modulech. Dále zde byl navržený program pro vyhodnocovací jednotku upraven a doplněn o část, která zajišťuje komunikaci přes USB.

V závěru této práce je popsán návrh aplikace pro PC, která provádí komunikaci s vyhodnocovací jednotkou a zobrazuje provozní hodnoty jednotlivých měřících modulů, potažmo výsledky měření a vyhodnocení koncentrace plynů. Aplikace dále zajišťuje kalibrační proces měřících modulů.

Cílem práce je navrhnout a zrealizovat zařízení, které je schopno vyhodnocovat nízkou koncentraci daných plynů v okolním prostředí. Pro přesné vyhodnocení koncentrace plynů je nutná kalibrace jednotlivých senzorů, respektive celého měřícího modulu.

2

Senzory plynů

V úvodu této kapitoly je zmíněn výčet základních principů senzorů pro měření koncentrace plynů. Dále je vysvětlen princip použitých senzorů plynů a uvedení příkladů senzorů, které do těchto skupin patří. Na konci kapitoly je uveden přehled limitů koncentrací měřených plynů.

2.1 Základní principy senzorů pro měření koncentrace plynů

Mezi základní principy senzorů, které jsou použity pro měření koncentrace plynů patří:

- Elektrochemický
- Katalytický
- Fotoionizační
- Infračervený
- Vodivostní

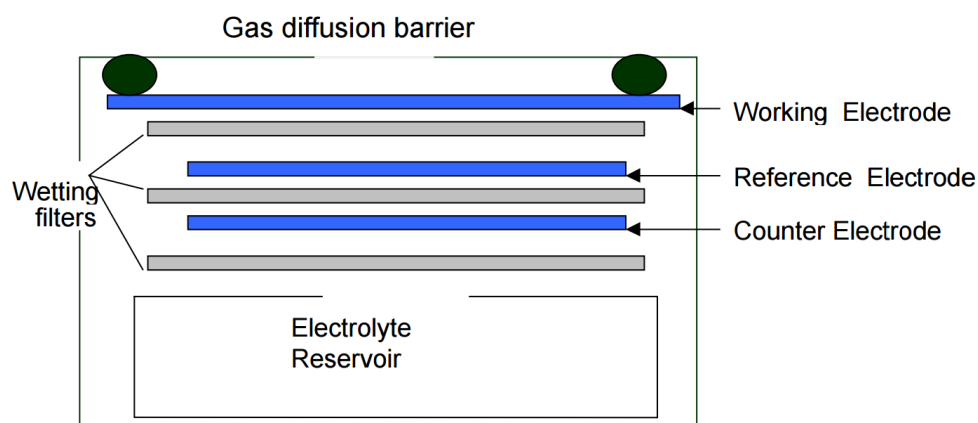
2.1.1 Popis elektrochemického principu

Elektrochemický princip je zejména využíván pro měření koncentrace kyslíku a toxických plynů. Tento princip se dále dělí na dvě části, a to z hlediska měření výstupní veličiny:

- Ampérometrický
- Potenciometrický

Dále bude dle zadání této práce blíže vysvětlen pouze ampérometrický princip. Základem ampérometrického senzoru jsou tři elektrody (dříve se používaly pouze dvě elektrody), elektrolyt a difuzní membrána. Návrh tohoto senzoru je na obr. 2.1. Měřený plyn

difunduje skrze membránu na pracovní elektrodu a dochází k redukci nebo oxidaci plynu. Tato chemická reakce způsobuje uvolnění iontů do elektrolytu. Elektrolyt umožní přenos iontů k pomocné elektrodě, kde nastává opačná reakce (oxidace nebo redukce). Tento jev má za následek vznik elektronů na pomocné elektrodě. Aby však docházelo k přenosu iontů v elektrolytu a toku elektronů, musí být na pracovní a pomocnou elektrodu přiveden zdroj napětí. Proud, který prochází senzorem je pak vyhodnocen a jeho velikost je úměrná koncentraci měřeného plynu. Přidáním referenční elektrody se eliminuje závislost velikosti proudu na polarizaci pomocné elektrody (ta je proměnná s tlakem, teplotou a dalšími vlivy okolí). Referenční elektroda má pevný potenciál, je umístěna blízko pracovní elektrody a je k ní vztažen potenciál pracovní elektrody. Difuzní membrána má vliv na selektivitu senzoru a omezuje odpařování elektrolytu. Rychlost odpařování elektrolytu se pak nepříznivě projevuje na životnosti senzoru. Zamezení tohoto negativního jevu lze docílit za použití pevného elektrolytu. Další vliv membrány je omezení proudu měřeného plynu do senzoru a zamezení vniku vlhkosti. Hydrofilní separátory (na obr. 2.1, označeny jako *wetting filters*) slouží pro lepší kontakt elektrolytu s elektrodami. [6]



Obr. 2.1: Schéma elektrochemického senzoru |Převzato z [6]|

Na obr. 2.2 je vyobrazen elektrochemický senzor CO-AF od výrobce Alphasense pro měření koncentrace oxidu uhelnatého. V tab. 2.1 je uveden přehled základních vlastností tohoto senzoru. Mezi nevýhody těchto senzorů patří křížová selektivita na některé druhy plynů, relativně dlouhá odezva na změnu koncentrace plynu, možnost poškození senzoru při překročení maximální koncentrace a teplotní závislost. Mezi výhody patří spolehlivost a nízká spotřeba.

Teplotní závislost senzoru je ukázána na obr. 2.3 a na obr. 2.4. Na obr. 2.3 je patrné, jak se výstup senzoru procentuálně mění v závislosti na změně teploty (změna offsetu výstupu), křivky v grafech zastupují jednotlivé senzory. Samotná citlivost senzoru je také závislá na teplotě. Tato závislost je ukázána na obr. 2.4, křivky zobrazují hlavní průběh a intervaly s 95% pravděpodobností.

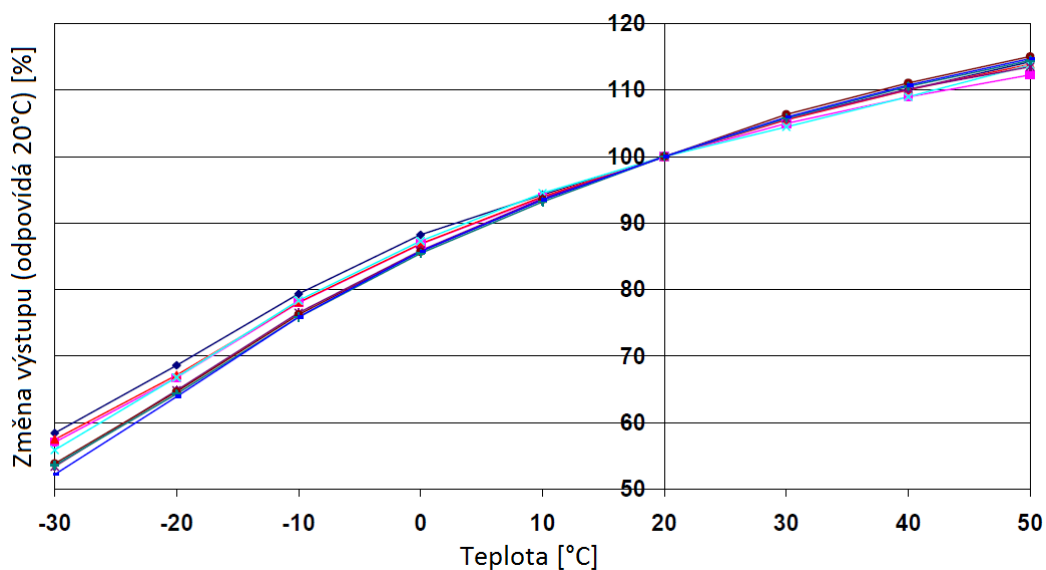


Obr. 2.2: Elektrochemický senzor Alphasense pro měření koncentrace oxidu uhelnatého

Parametr	Hodnota
Citlivost	55 až 100 nA/ppm při 400 ppm CO
Čas odezvy	< 30 s od 0 do 400 ppm CO
Nulový proud	< ± 3 ve vzduchu (1)
Šum	< 0.5 (1)
Max. koncentrace	2000 ppm
Linearita	< ±40 ppm v celém rozsahu měření
Teplotní rozsah	-30 až +50 °C
Tlak prostředí	80 až 120 kPa
Relativní vlhkost prostředí	15 až 90 %

(1) Hodnota ekvivalentní ppm

Tab. 2.1: Přehled parametrů senzoru CO-AX |Převzato z [9]|

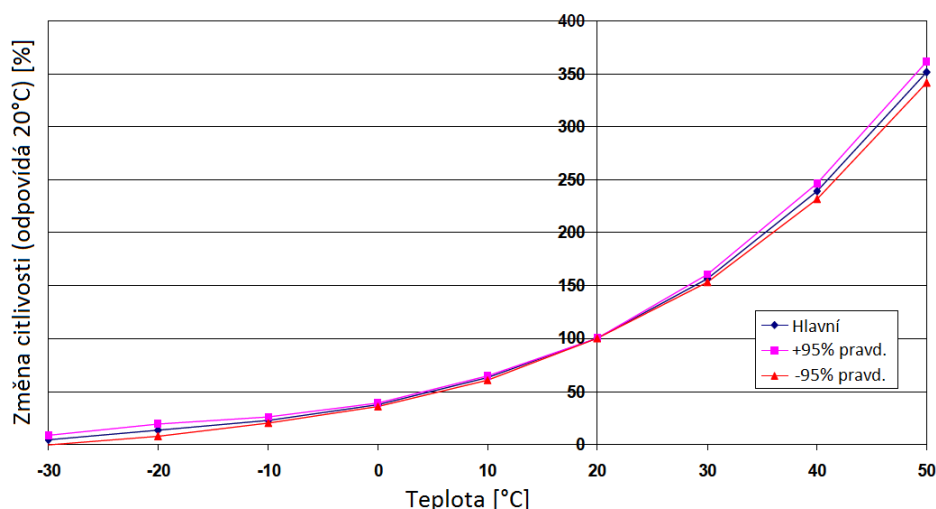


Obr. 2.3: Výstup senzoru v závislosti na změně teploty |Převzato z [9]|

2.1.2 Popis katalytického principu

Katalytický (též označovaný jako termochemický) senzor je využíván pro měření hořlavých a výbušných plynů. Jeho princip je založen na dvou spirálkách z platinového drátku zalitých v hliníkových perličkách. Na jedné perličce je nanesena látka (katalyzátor), která podněcuje oxidaci hořlavých plynů. Na druhé je nanesena látka, která slouží pro inhibici (potlačení) oxidace. Platinovým drátkem prochází proud, který ohřívá hliníkové perličky. Poté dochází k oxidaci hořlavých plynů na katalyzátoru a zvýšení teploty této hliníkové perličky, potažmo platinové spirálky. To má za následek zvýšení elektrického odporu spirálky a změnu poměru odporů spirálek. Pro oxidaci plynu je zapotřebí určitého množství kyslíku (alespoň 10 %). [5] Nejčastěji se pro vyhodnocení používá můstková metoda (Wheatstnův můstek).

Mezi výhody tohoto senzoru patří rychlá odezva na změnu koncentrace plynu, linearita a cena senzoru. Nicméně po zapnutí napájení senzoru, je nutné vyčkat (řádově minuty), než se senzor ustálí. Hlavní nevýhodou senzoru je poměrně vysoká spotřeba (stovky mW). Na obr. 2.5 je vidět, jak vypadá katalytický senzor pro měření koncentrace metanu od výrobce Alphasense a v tab. 2.2 je uveden přehled jeho základních vlastností. Teplotní závislost katalytického senzoru není tak vysoká jako v případě senzoru elektrochemického.



Obr. 2.4: Citlivost senzoru v závislosti na změně teploty [Převzato z [9]]



Obr. 2.5: Katalytický senzor Alphasense pro měření koncentrace metanu

Citlivost	15 až 22 mV/% metanu (1)
Čas odezvy	< 15 s (2)
Výstup při nulové koncentraci	±20 mV
Rozsah koncentrace	0 až 100 %LEL
Nelinearita	max. ±6 % v celém rozsahu
Rozsah pracovní teploty	-40 až +55 °
Napájecí napětí	3 V
Příkon	190 mW

(1) 5 % metanu odpovídá 100 %LEL (*Lower Explosive Limit*)

(2) Z nulové koncentrace na 50 %LEL

Tab. 2.2: Přehled parametrů senzoru CH-A3 |Převzato z [10]|

2.2 Mezní koncentrace plynů

Plyny, jejichž koncentrace bude měřena a vyhodnocována jsou uvedeny v tab. 2.3. Tab.2.3 dále obsahuje chemické značky plynů a limity jejich koncentrací. Jedná se o limitní koncentrace vnitřních prostředí staveb a jsou uvedeny ve vyhlášce č. 6/2003 Sb. (vyhláška, která stanovuje hygienické limity chemických, fyzikálních a biologických ukazatelů pro vnitřní prostředí obytných místností některých staveb). Mezní limity pro venkovní prostředí nebo krátkodobé koncentrace jsou mnohem vyšší, jedná se řádově o desítky až stovky ppm.

Plyn	Chemická značka	Mezní koncentrace
Metan	CH ₄	-
Oxid uhelnatý	CO	4,365 ppm
Amoniak	NH ₃	0,288 ppm
Oxid dusičitý	NO ₂	0,144 ppm

Tab. 2.3: Přehled měřených plynů a jejich mezních koncentrací ve vnitřních prostorech budov

3

Prototyp vyhodnocovací jednotky a komunikace se senzorovými moduly

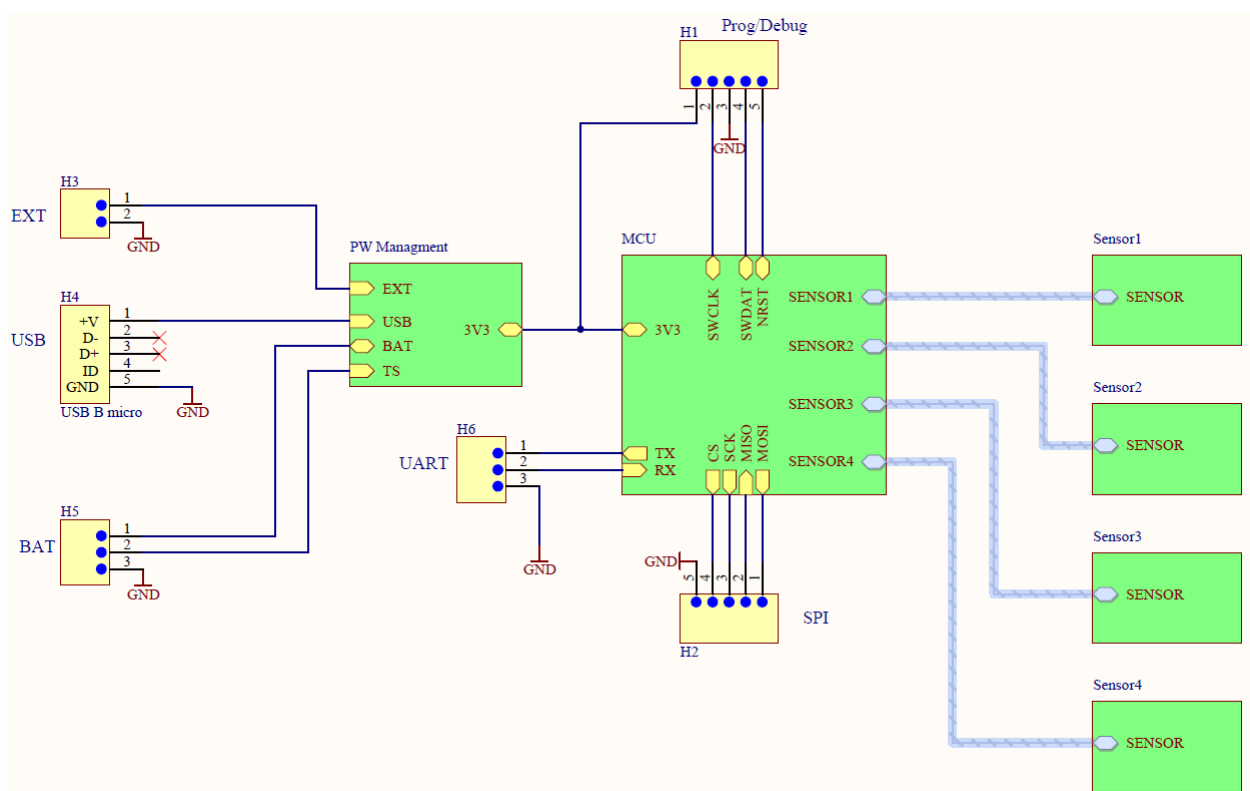
Na začátku této kapitoly je popsán princip řešení prototypu vyhodnocovací jednotky a rozbor jednotlivých funkčních bloků. Dále jsou uvedeny typy měřících modulů a jejich princip vyhodnocení koncentrace plynu. Návrh prototypu vyhodnocovací jednotky a měřících modulů není součástí této práce, byly předloženy po předchozím vývoji na katedře technologií a měření. V závěru jsou uvedeny výpočty týkající se jednotlivých senzorů, respektive jednotlivých měřících modulů.

3.1 Principiální řešení vyhodnocovací jednotky

Systém vyhodnocovací jednotky je řešen modulárně, tzn. je rozdělen na samostatnou vyhodnocovací část a jednotlivé měřící moduly. Vyhodnocovací část jednotky se stará o komunikaci s měřícími moduly a jejich nastavení (inicializace modulů). Toto nastavení je vždy nutné po zapnutí jednotky. Jednotlivé kroky nastavení budou probrány níže. Dalším úkolem vyhodnocovací části je komunikace s nadřazeným systémem a správa napájecí části jednotky. Vyhodnocovací jednotka je detailně popsána níže. Jednotlivé měřící moduly obsahují senzory pro měření koncentrace daných plynů a podpůrnou elektroniku. HW řešení modulů, jejich nastavení a s tím spojené výpočty jsou uvedeny v 3.2.

Blokové schéma vyhodnocovací části jednotky je ukázáno na obr. 3.1, podrobné schéma jednotky je uvedeno v příloze A. Vyhodnocovací část jednotky se skládá z mikrokontroléru (dále jen MCU), obvodů pro správu napájení a konektorů pro měřící moduly a komunikaci. MCU je STM32F051C6T6 od výrobce STMicroelectronics, jedná se o 32-bitový mikrokontrolér s jádrem Cortex M0 a architekturou typu RISC. Přehled hlavní parametrů je uveden v tab 3.1.

Vzhledem k těmto údajům je tento MCU plně dostačující pro danou aplikaci. Jelikož je nutnost komunikace jednotky s PC (např. při kalibraci senzorů), je největší nevýhodou absence USB řadiče. Tento problém bude řešen v další verzi jednotky.



Obr. 3.1: Blokové schéma vyhodnocovací části jednotky

Flash paměť	32 kB
SRAM paměť	8 kB
Čítače	1 (16-bit, rozšířená funkčnost) 5 (16-bitový, obecné použití) 1 (32-bitový, obecné použití) 1 (16-bitový, základní)
Komunikační rozhraní	SPI, I2C, USART
12-bitový ADC	1 (10 exter. kan., 3 inter. kan.)
12-bitový DAC	1
Analog. komparátor	2
Max. CPU frekvence	48 MHz
Pouzdro	LQFP48

Tab. 3.1: Přehled parametrů STM32F051C6T6

Další nedílnou částí je správa napájení. Celá jednotka je napájena z Li-Ion baterie, a proto je nutné řešit nabíjení článku a hlídat jeho mez vybití. Proces nabíjení a hlídání kritické meze vybití článku má velký vliv na životnost baterie. Tyto cykly jsou záležitostí speciálních obvodů tzv. Power management. Zde byl zvolen obvod BQ24032A od výrobce Texas Instruments. Tento obvod je navržen pro nabíjení jedno-článekových Li-Ion nebo Li-Polymer baterií. Výhodou tohoto obvodu je možnost nabíjení baterie z USB portu, kde se nechá volit maximální proudový odběr (100 mA nebo 500 mA). Další možností nabíjení je z externího zdroje (např. stabilizovaný zdroj nebo adaptér). V tomto případě se volí maximální nabíjecí proud velikostí odporu připojeným k obvodu. Režim volby zdroje pro nabíjení baterie je volitelný (pokud není použit, je primárně volen externí zdroj). Dále má obvod vstup pro měření teploty článku, vstupy pro signalizaci funkce obvodu (ty mohou být připojeny k MCU nebo přímo k LED diodám) a výstupy pro napájení systému. Přehled hlavních parametrů tohoto obvodu je uveden v tab. 3.2.

Typ článku	Li-Ion, Li-Polymer
Vstupní napětí	max. 16 V
Nabíjecí napětí	4,2 V
Nabíjecí proud	max. 1,5 A
Pouzdro	QFN20

Tab. 3.2: Přehled parametrů BQ24032A

Aby byl systém napájení kompletní je ještě doplněn o LDO stabilizátor MCP1825S-330E/DB od výrobce Microchip. Jeho vlastnosti jsou zobrazeny v tab 3.3.

Max. výstupní proud	500 mA
Výstupní napětí	3,3 V
Vstupní napětí	3,51 až 6 V
LDO	210 mV (1)
Pouzdro	SOT223

(1) Úbytek napětí na stabilizátoru při výstupním proudu 500 mA

Tab. 3.3: Přehled parametrů MCP1825S-330E/DB

3.2 Měřicí moduly

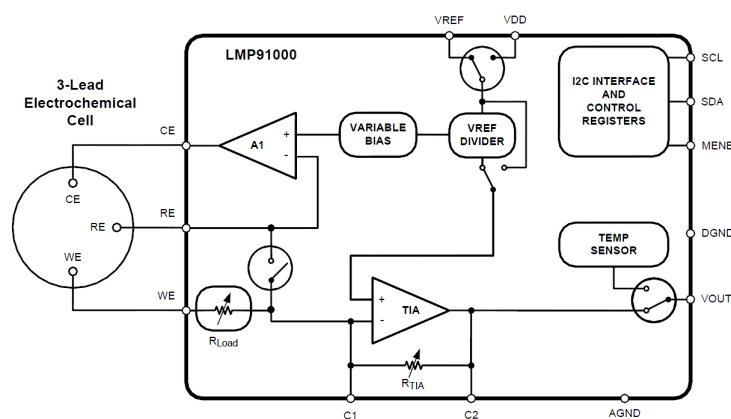
Pro měření koncentrací požadovaných plynů byly vytvořeny dva základní měřicí moduly. První modul slouží pro měření katalytickým senzorem, druhý modul je určen pro měření elektrochemickým senzorem. Schémata týkajících se senzorů jsou uvedeny v příloze A.

3.2.1 Měření koncentrace katalytickým senzorem

Tento měřicí modul slouží pro měření koncentrace metanu (CH_4). Senzor plynu využívá katalytického principu, který byl popsán v kapitole 2.1.2. Základem je tedy senzor a podpůrná elektronika, která je hlavně tvořena digitálně řízeným potenciometrem (DCP), přístrojovým zesilovačem a pamětí EEPROM. Jelikož výstupní měřenou veličinou senzoru je změna elektrického odporu, je pro vyhodnocení využita metoda Wheatstnova můstku. Pro vyvážení můstku je použit DCP. Vyvážení je zde nutné, kvůli rozdílnému odporovému poměru mezi elektrodami každého senzoru. Toto vyvážení se provádí před každou kalibrací, a to z důvodu stárnutí (degradace) senzoru. Vzhledem k malé změně měřeného napětí můstku je poté zařazen přesný přístrojový zesilovač. Výstup zesilovače je poté snímán A/D převodníkem přímo na desce modulu nebo interním A/D převodníkem v MCU. Výsledek konverze je poté dále zpracován vyhodnocovací jednotkou. Paměť EEPROM je zde z důvodu uchování dat, která jsou pro každý měřicí modul unikátní (např. identifikační číslo modulu, datum výroby, datum kalibrace, platnost kalibrace, kalibrační koeficienty a hodnota pro nastavení DCP).

3.2.2 Měření koncentrace elektrochemickým senzorem

Druhý měřicí modul má širší uplatnění. Je určen pro měření koncentrace oxidu dusičitého (NO_2), amoniaku (NH_3) a oxidu uhelnatého (CO). Sensory těchto plynů jsou založeny na elektrochemickém principu, který byl uveden v 2.1.1. Základem je opět daný senzor (pro každý plyn jiný) a elektronika pro měření a uchování dat. Hlavní část měřicí elektroniky je tvořena integrovaným obvodem LMP91000 (blíže popsán níže) a A/D převodníkem. Následuje opět zpracování vyhodnocovací jednotkou. Použití paměti EEPROM je totožné s předchozím měřicím modulem.



Obr. 3.2: Typické zapojení LMP91000 pro 3-vývodový elektrochemický senzor [Převzato z [8]]

Integrovaný obvod LMP91000 je vyráběn firmou Texas Instruments. Je přímo určen pro použití s elektrochemickými senzory a je označován jako AFE obvod (*Analog Front-End*). Komunikace s obvodem probíhá po I2C sběrnici a slouží k optimálnímu nastavení

obvodu. Lze zde nastavit např. zesílení, zatěžovací odpor, interní nulu (napětí na výstupu při nulové koncentraci), předpětí a režim obvodu (možnost měřit i teplotu čipu). Bližší informace o tomto obvodu jsou dostupné v [8]. Typické zapojení obvodu pro 3-vývodový elektrochemický senzor je na obr. 3.2

3.3 Výpočty pro nastavení měřících modulů

V této části jsou uvedeny výpočty, které udávají optimální nastavení modulů v závislosti na požadované citlivosti. Musí se zde brát v potaz citlivost senzoru na jednotku koncentrace (%LEL nebo ppm) a maximální měřené koncentraci. Prozatím se uvažuje měření výstupního napětí měřícího modulu interním A/D převodníkem v MCU, proto maximální rozsah napětí je 0 V až 3,3 V.

3.3.1 Měření metanu

Pro měření koncentrace metanu je zde použit senzor CH-A3 výrobce Alphasense. Jeho základní parametry jsou shrnuty v tab. 3.4.

Citlivost	15 až 22 mV/% metanu (1)
Čas odezvy	< 15 s (2)
Výstup při nulové koncentraci	±20 mV
Rozsah koncentrace	0 až 100 %LEL
Nelinearita	max. ±6 % v celém rozsahu
Rozsah pracovní teploty	-40 až +55 °
Napájecí napětí	3 V
Příkon	190 mW

(1) 5 % metanu odpovídá 100 %LEL (Lower Explosive Limit)

(2) Z nulové koncentrace na 50 %LEL

Tab. 3.4: Přehled parametrů senzoru CH-A3 [Převzato z [10]]

Rovnice 3.1 udává maximální výstupní napětí na výstupu senzoru, kde $U_{1\%}$ je maximální citlivost senzoru při 1% koncentraci metanu a K_{max} je maximální měřená koncentrace.

$$\begin{aligned}
 U_{max} &= U_{1\%} \cdot K_{max} \\
 &= 22 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \\
 &= 110mV
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Aby bylo možné měřit rozvážení můstku do záporných výchylek (při kalibraci), je zde nutný napěťový offset. Velikost offsetu je dán rov. 3.2, kde U_{ref} je napěťová reference rovna 2,5 V. Napětí na výstupu můstku je poté zesíleno. Zesílení je dáno rov. 3.3 a rozsah

napětí na výstupu je pak dle rov. 3.4. Tím je splněna podmínka, že maximální napětí na výstupu musí být nižší než 3,3 V.

$$\begin{aligned} U_{offset} &= \frac{R8}{R7 + R8} \cdot U_{ref} \\ &= \frac{11 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3 + 11 \cdot 10^3} \cdot 2,5 \\ &= 248mV \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} G &= 1 + \frac{100 \cdot 10^3}{R_G} \\ &= 1 + \frac{100 \cdot 10^3}{3,83 \cdot 10^3} \\ &= 27,11 \quad [-] \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$U_{offset} \div (U_{offset} + G \cdot U_{max}) = 248mV \div 3,23V \quad (3.4)$$

3.3.2 Měření oxidu uhelnatého

Pro měření koncentrace oxidu uhelnatého je použit senzor CO-AX, výrobce Alphasense. Tab. 3.5 udává základní parametry senzoru.

Citlivost	55 až 100 nA/ppm (1)
Čas odezvy	< 30 s (2)
Výstup při nulové koncentraci	< ±3 (3)
Šum	< 0.5 (3)
Rozsah koncentrace	0 až 2000 ppm
Nelinearita	< ±40 ppm v celém rozsahu
Rozsah pracovní teploty	-30 až +50 °

(1) Při 400 ppm CO

(2) Z nulové koncentrace na 400 ppm

(3) Ekvivalentní ppm

Tab. 3.5: Přehled parametrů senzoru CO-AX |Převzato z [9]|

Dle rovnice 3.5 je počítán maximální proud senzorem, kde I_{1ppm} je maximální citlivost a K_{max} je maximální měřená koncentrace. Jelikož je na pracovní elektrodě probíhá oxidace je vnitřní nula obvodu LMP91000 nastavena na 20 % z napěťové reference, tedy $U_{intzero} = 0,5$ V (tzn. při vzrůstající koncentraci se napětí na výstupu obvodu zvyšuje). Zesílení je dáno nastavením odporu R_{TIA} v registru obvodu, velikost tohoto odporu byla zvolena na 14 kΩ. Z toho pak vyplývá napěťový rozsah na výstupu (rov. 3.6).

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_{1ppm} \cdot K_{max} \\
 &= 100 \cdot 10^{-9} \cdot 2000 \\
 &= 200\mu A
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

$$U_{intzero} \div (U_{intzero} + R_{TIA} \cdot I_{max}) = 0,5V \div 3,3V \tag{3.6}$$

3.3.3 Měření amoniaku

Zde je použit senzor NH3 500 SE od výrobce City Technology, jeho princip je shodný s předchozím (opět oxidační). V tab. 3.6 základní parametry senzoru. Rov. 3.7 udává maximální proud senzorem. Velikost vnitřní nuly je stejná s předchozím. Odpor $R_{TIA} = 35 k\Omega$. Napěťový rozsah na výstupu je pak dle rov. 3.8.

Citlivost	20 až 50 nA/ppm
Čas odezvy	< 90 s
Výstup při nulové koncentraci	< ± 100 nA
Rozsah koncentrace	0 až 500 ppm
Nelinearita	< ± 10 % v celém rozsahu
Rozsah pracovní teploty	-20 až +40 °

Tab. 3.6: Přehled parametrů senzoru NH3 500 SE |Převzato z [16]|

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_{1ppm} \cdot K_{max} \\
 &= 500 \cdot 10^{-9} \cdot 500 \\
 &= 25\mu A
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

$$U_{intzero} \div (U_{intzero} + R_{TIA} \cdot I_{max}) = 0,5V \div 1.375V \tag{3.8}$$

3.3.4 Měření oxidu dusičitého

Pro měření koncentrace oxidu dusičitého je použit senzor NO2-A1 výrobce Alphasense. Tab. 3.7 obsahuje základní parametry senzoru. Tento typ senzoru je redukční, tzn. vnitřní nula obvodu LMP91000 musí být nastavena vyšší. Při vzrůstající koncentraci se napětí na výstupu obvodu bude snižovat. Vnitřní nula obvodu je tedy nastavena na 67 % z napěťové reference, respektive $U_{intzero} = 1,675$ V. Rov. 3.9 udává maximální proud senzorem. Zesilovací odpor byl zvolen $R_{TIA} = 35 k\Omega$. Tudíž rozsah napětí na výstupu je dle rov. 3.10.

$$\begin{aligned}
 I_{max} &= I_{1ppm} \cdot K_{max} \\
 &= -750 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \\
 &= -15\mu A
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Citlivost	-400 až -750 nA/ppm (1)
Čas odezvy	< 50 s (2)
Výstup při nulové koncentraci	< ±0,4 (3)
Šum	< 0,02 (3)
Rozsah koncentrace	0 až 20 ppm
Nelinearita	< ±1,5 ppm v celém rozsahu
Rozsah pracovní teploty	-20 až +50 °

(1) Při 10 ppm NO₂

(2) Z nulové koncentrace na 10 ppm

(3) Ekvivalentní ppm

Tab. 3.7: Přehled parametrů senzoru NO₂-A1 |Převzato z [13]|

$$U_{intzero} \div (U_{intzero} + R_{TIA} \cdot I_{max}) = 1,675V \div 1,15V \quad (3.10)$$

4

Návrh programu pro komunikaci s měřicími moduly a nadřazenou jednotkou

V této části je popsán program vyhodnocovací jednotky, který se stará o komunikaci s měřicími moduly a nadřazenou komunikační jednotkou. Základní části programu jsou:

- Identifikace zasunutých měřících modulů do vyhodnocovací jednotky
- Inicializace měřících modulů
- Vyčítání dat z paměti měřících modulů
- Ukládání dat do paměti měřících modulů
- Výpočet hodnot koncentrací
- Komunikace s PC
- Komunikace s nadřazenou jednotkou

Vývojový diagram programu je ukázán na obr. 4.1.

4.1 Start programu

Po zapnutí jednotky je provedeno nastavení hodin a inicializace periférií MCU. Poté proběhne identifikace zasunutých měřících modulů pomocí vnitřního A/D převodníku MCU a napěťového děliče na měřícím modulu (každý modul má odlišný dělicí poměr). Dále následuje inicializace modulů. Ta se skládá z:

- Vyčtení dat z paměti EEPROM
- Nastavení digitálního potenciometru (vyvážení můstku) či obvodu LMP91000

V paměti EEPROM jsou uloženy data dle tabulky 4.1. Důležitým údajem jsou zejména kalibrační koeficienty. Ty jsou získány při kalibraci jednotlivých modulů a jsou využity pro výpočet koncentrace plynu. Samotná kalibrace bude probrána níže.

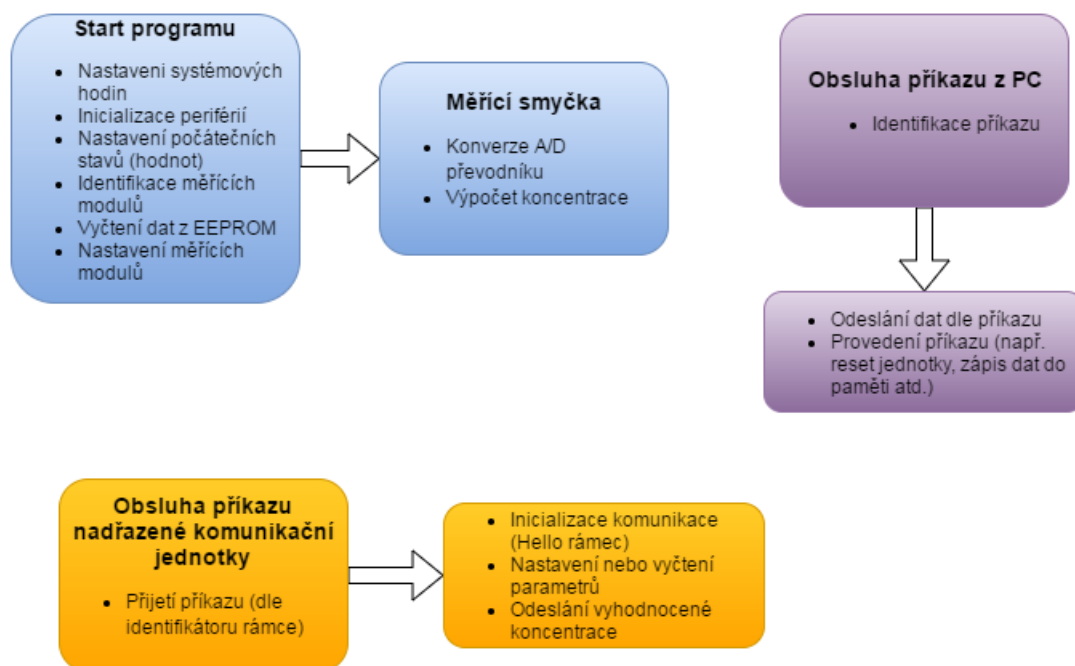
4.2 Měřicí smyčka

V hlavní měřicí smyčce se periodicky provádí konverze (prozatím po poslední konverzi následuje hned první) výstupního napětí A/D převodníkem v MCU a poté tato hodnota přepočítána kalibračními koeficienty. Výsledek výpočtu je uložen do globální proměnné a je okamžitě k dispozici při dotazu na aktuální koncentraci ze strany PC nebo nadřazené jednotky.

4.3 Komunikace jednotky s PC

Při komunikaci vyhodnocovací jednotky s PC je využita periférie UART. Je zde nutnost použití externího převodníku UART-USB. Komunikace je prováděna na základě principu dotaz → odpověď (ze strany PC). Jednotlivé příkazy ze strany PC jsou:

- Dotaz na data z měřících modulů
- Dotaz na obsazení konektorů
- Příkaz na reset jednotky
- Dotaz na obsah EEPROM



Obr. 4.1: Vývojový diagram programu

Adresa bytu v EEPROM	Význam obsahu EEPROM
0x00	Den výroby
0x01	Měsíc výroby
0x02	Rok výroby (-2000)
0x03	Identifikační číslo
0x10	Den kalibrace
0x11	Měsíc kalibrace
0x12	Rok kalibrace (-2000)
0x13 - 0x14	Platnost kalibrace (počet dní)
0x15	Relativní vlhkost [%] (1)
0x16	Průtok plynu [l/min] (1)
0x20 - 0x23	Kalibrační koeficient A (2)
0x24 - 0x27	Kalibrační koeficient B (2)
0x30	TIACN/DCP registr (3)
0x31	REFCN registr (3)
0x32	MODECN registr (3)

(1) Okolní podmínky při kalibraci měřících modulů

(2) Kalibrační koeficienty jsou typu float (rozděleny do čtyř bytů)

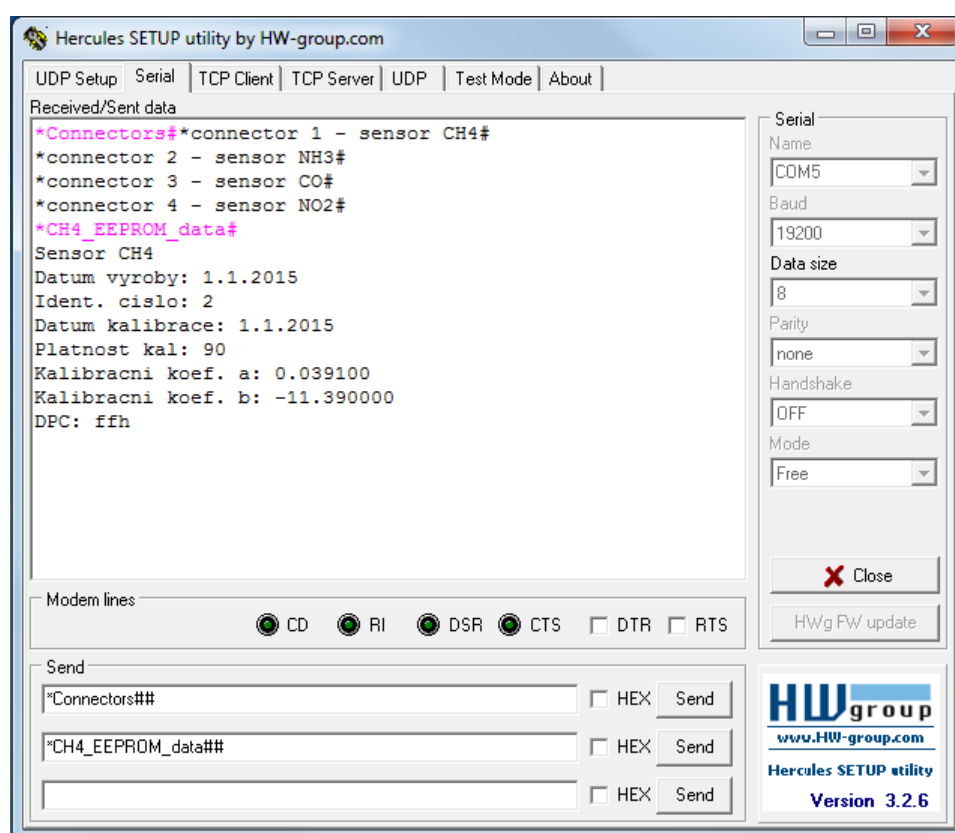
(3) Registry obvodu LMP91000 nebo digitálního potenciometru

Tab. 4.1: Přehled uložených dat v paměti EEPROM

- Příkaz na zápis dat do EEPROM

Pro komunikaci s jednotkou na straně PC byl prozatím použit program Putty nebo Hercules, ve kterém se otevře sériový kanál (nastavení je shodné s parametry periférie UART v MCU). Parametry komunikace jsou: modulační rychlost je 19200 Bd, délka slova je 8 bitů, 1 stop bit, bez parity, handshake nepovolen.

Data z měřících modulů mají dvě části. První část je hodnota A/D převodníku a tato hodnota je využita pro kalibrační proces. Druhá část je přímo hodnota koncentrace plynu, ta je vypočítána vyhodnocovací jednotkou pomocí kalibračních koeficientů. Ukázka výpisu obsazenosti konektorů a obsah EEPROM je zobrazena na obr. 4.2. Pro zápis dat do EEPROM byl stanoven pevný datový rámec, jeho struktura je ukázána na obr. 4.3.



Obr. 4.2: Ukázka výpisu obsazení konektorů a EEPROM dat



Obr. 4.3: Datový rámec pro zápis dat do EEPROM

Nevýhodou tohoto způsobu komunikace je nutnost použití externího převodníku USB/UART a komplikovaný zápis dat do paměti modulů, potažmo celková komunikace. Proto bude v další části této práce (v kapitole 5) řešen návrh komunikace PC s jednotkou přímo přes

USB a bude proveden návrh PC aplikace pro komunikaci s jednotkou a snadnou kalibraci měřících modulů.

4.4 Komunikace s nadřazenou jednotkou

Pro vyzkoušení komunikace s nadřazenou komunikační jednotkou byl vyzkoušen dodaný prototyp jednotky. Tento prototyp i struktura zpráv není součástí této práce. Při komunikaci vyhodnocovací jednotky s nadřazenou jednotkou je opět použit UART. Podle požadavků ze strany nadřazené jednotky, jsou zde tři okruhy zpráv:

- Inicializace komunikace
- Servisní zprávy
- Datové zprávy

Inicializace komunikace slouží pro prvotní nastavení komunikace. Po přijetí tohoto rámce vyhodnocovací jednotka (v tomto případě se chová jako *Slave*) vrací identifikátor, verzi a stav jednotky. Dále vrací velikost datových odpovědí (počet bytů), napětí baterie (v násobcích 50 mV) a další. Celá specifikace datového rámce je ukázána v tab. 4.2.

Instrukce (identifikátor rámce)	Význam zprávy	Datová část <i>Master</i> [počet bytů]	Odpověď <i>Slave</i> [počet bytů]
0x00	Hello paket	0h [1 B]	Typ, verze, stav, napětí, teplota, velikost dat. odpovědí, teplota, expirace, další využití, [14]

Tab. 4.2: Inicializace komunikace

Některé parametry nejsou využity a vyhodnocovací jednotka vrací hodnotu dle dohody s tvůrci nadřazené jednotky. Dalším typem zpráv jsou servisní zprávy. Souhrn těchto zpráv je zobrazen v tab. 4.3. Tyto zprávy slouží k nastavení nebo vyčtení některých parametrů. Datové zprávy obsahují vyhodnocené koncentrace daných měřících modulů. Jejich specifikace je uvedena v tab. 4.4.

4.5 Kalibrace měřících modulů

Jelikož každý senzor má rozdílnou citlivost a jeho odezva na změnu koncentrace plynu je velmi malá, projevují se zde i chyby podpůrné (měřící) elektroniky. Proto je nutnost každý měřící modul kalibrovat. Kalibrace spočívá ve vystavení senzoru dané koncentraci plynu.

Instrukce (identifikátor rámce)	Význam zprávy	Datová část <i>Master</i> [4 B]	Odpověď <i>Slave</i> [4 B]
0x01	Proveď reset	0h	4F4Bh <i>Slave</i> odpoví a provede reset
0x02	Modul připraven	Číslo konektoru	0h <i>Slave</i> odpoví 0, pokud je modul připraven, jinak pošle číslo chyby (1)
0x03	Nastav provozní parametr	X (uint32)	X (uint32) <i>Slave</i> nastaví provozní parametr na hodnotu X (2)
0x04	Vyčti provozní parametr	0h	X (uint32) <i>Slave</i> pošle hodnotu provozního parametru (2)
0x05	Přejdi do sleep	0h	0h <i>Slave</i> odpoví 0 a přejde do sleep módu, pokud není modul připraven pošle číslo chyby (1)

(1) Čísla chyb nejsou doposud stanoveny, pokud nastane jakákoliv chyba, je odeslána 1h

(2) Provozní parametr není zatím definován, v jednotce je uložena hodnota do globální proměnné

Tab. 4.3: Souhrn servisních zpráv

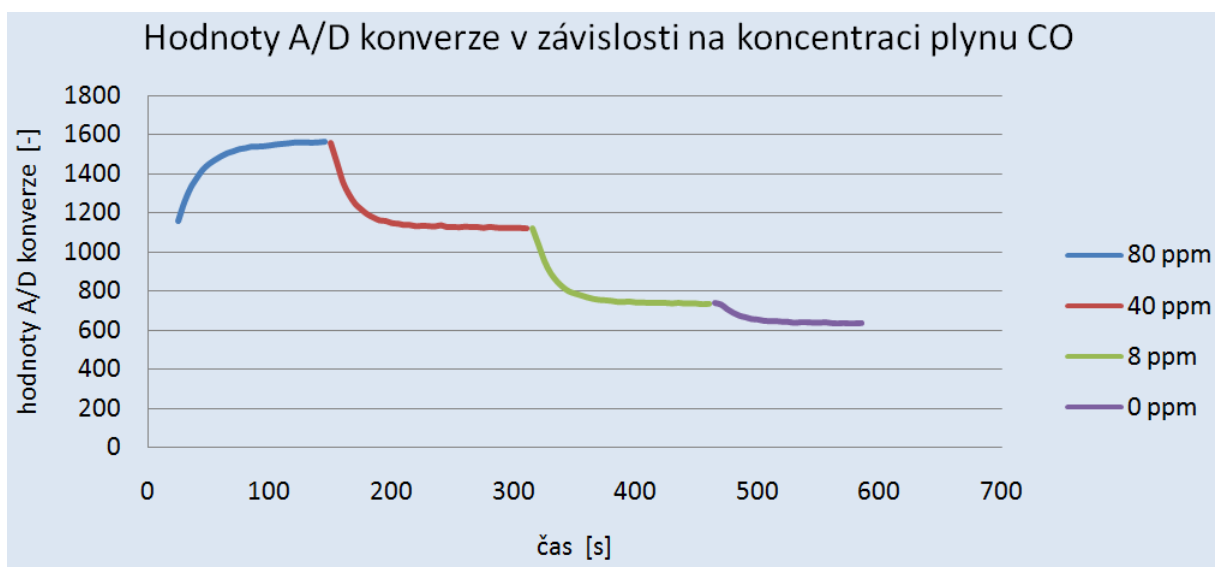
Instrukce (identifikátor rámce)	Význam zprávy	Datová část <i>Master</i> [1 B]	Odpověď <i>Slave</i> [4 B]
0x40	Měřicí modul 1	0h	Hodnota koncentrace měřicího modulu v konektoru 1
0x41	Měřicí modul 2	0h	Hodnota koncentrace měřicího modulu v konektoru 2
0x42	Měřicí modul 3	0h	Hodnota koncentrace měřicího modulu v konektoru 3
0x43	Měřicí modul 4	0h	Hodnota koncentrace měřicího modulu v konektoru 4

Tab. 4.4: Souhrn datových zpráv

Poté jsou vyčteny hodnoty konverze A/D převodníku. Tento krok se provede v několika hodnotách koncentrace plynu. Ustálené hodnoty konverze A/D převodníku pro jednotlivé koncentrace jsou proloženy přímkou (metoda nejmenších čtverců). Z obecné rovnice přímky (rov. 4.1) se získají kalibrační koeficienty. Kde kalibrační koeficient A je směrnice přímky a kalibrační koeficient B je posun ve svislé ose.

$$y = A \cdot x + B \tag{4.1}$$

Zde je uveden příklad kalibrace měřícího modulu pro oxid uhelnatý. Na obr. 4.4 je ukázán časový průběh hodnot A/D převodníku v závislosti na koncentraci plynu. V tab. 4.5 jsou uvedeny ustálené hodnoty A/D převodníku a tyto hodnoty jsou poté proloženy přímkou (obr. 4.5). Z přímky jsou získány kalibrační koeficienty (viz výše), které se uloží do paměti modulu a jsou využity pro výpočet koncentrace.

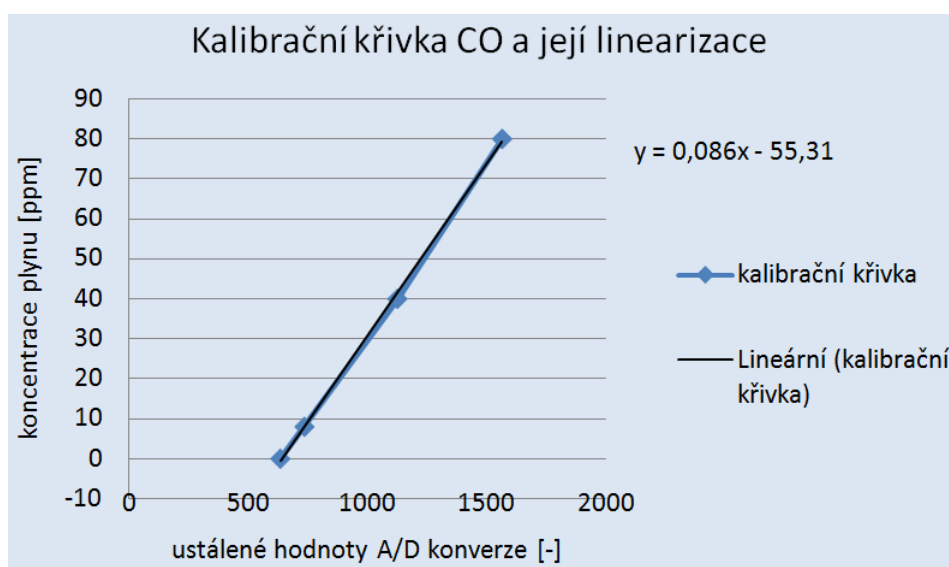


Obr. 4.4: Časový průběh hodnot A/D konverze v závislosti na koncentraci plynu CO

Koncentrace plynu [ppm]	Ustálené hodnoty A/D konverze [-]
0	635
8	736
40	1125
80	1564

Tab. 4.5: Ustálené hodnoty A/D konverze odpovídající dané koncentraci plynu

Výčet hodnot A/D převodníku byl proveden jednoduchým programem po sériové lince, poté program vygeneroval soubor s příponou *.csv*. Další zpracování hodnot bylo provedeno pomocí Microsoft Office Excel. Tato metoda byla použita i pro ostatní měřící moduly. Vzhledem k časové náročnosti kalibrace jednoho modulu bude vytvořen program, který tento proces zjednoduší a urychlí (kapitola 6).



Obr. 4.5: Kalibrační křivka a její linearizace měřícího modulu pro plyn CO

5

Vlastní návrh vyhodnocovací jednotky a měřících modulů, program pro vyhodnocení a komunikaci s PC

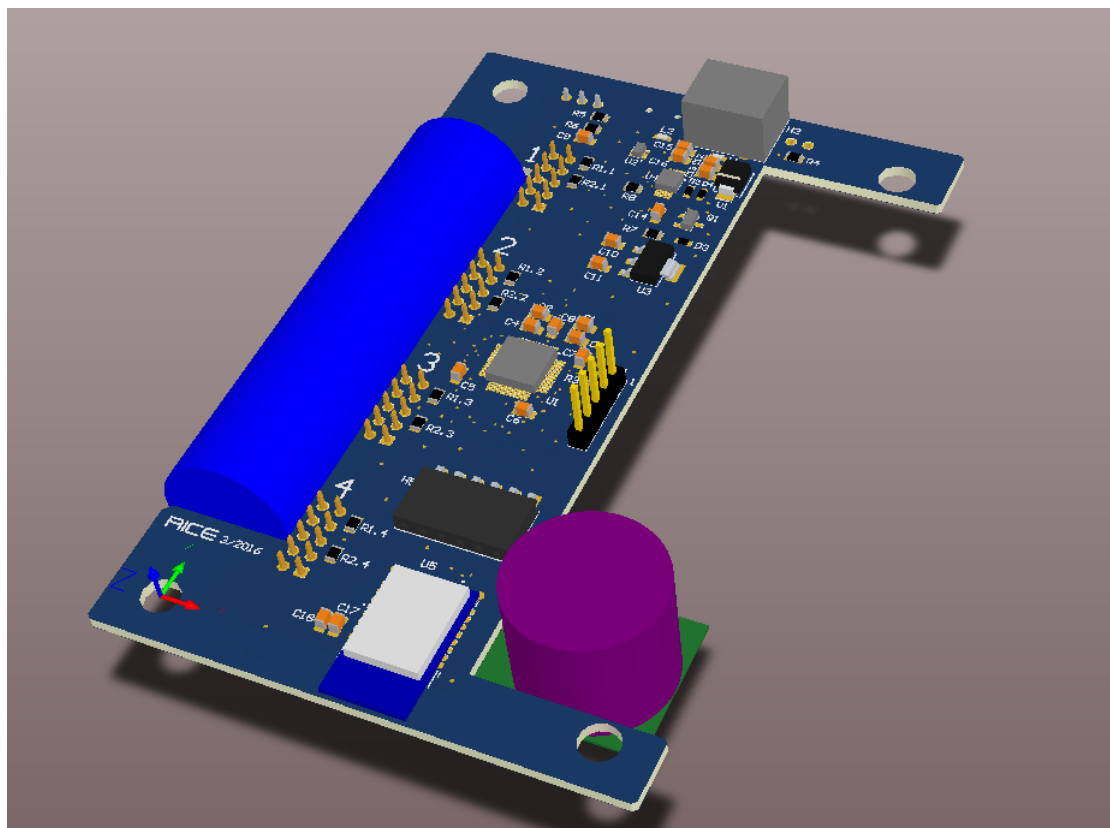
V této kapitole je popsán návrh vlastního řešení vyhodnocovací jednotky a měřících modulů. Jsou zde navrženy a realizovány změny oproti stávajícímu prototypu. Při návrhu změn (vylepšení) byl kladen důraz zejména na:

- Komunikaci jednotky s PC přímo přes USB
- Možnost kalibrace více shodných měřících modulů najednou
- Přímé připojení nadřazené komunikační jednotky
- Použití elektrochemických senzorů pro měření koncentrace v ppb
- Příprava celé jednotky na budoucí sériovou výrobu

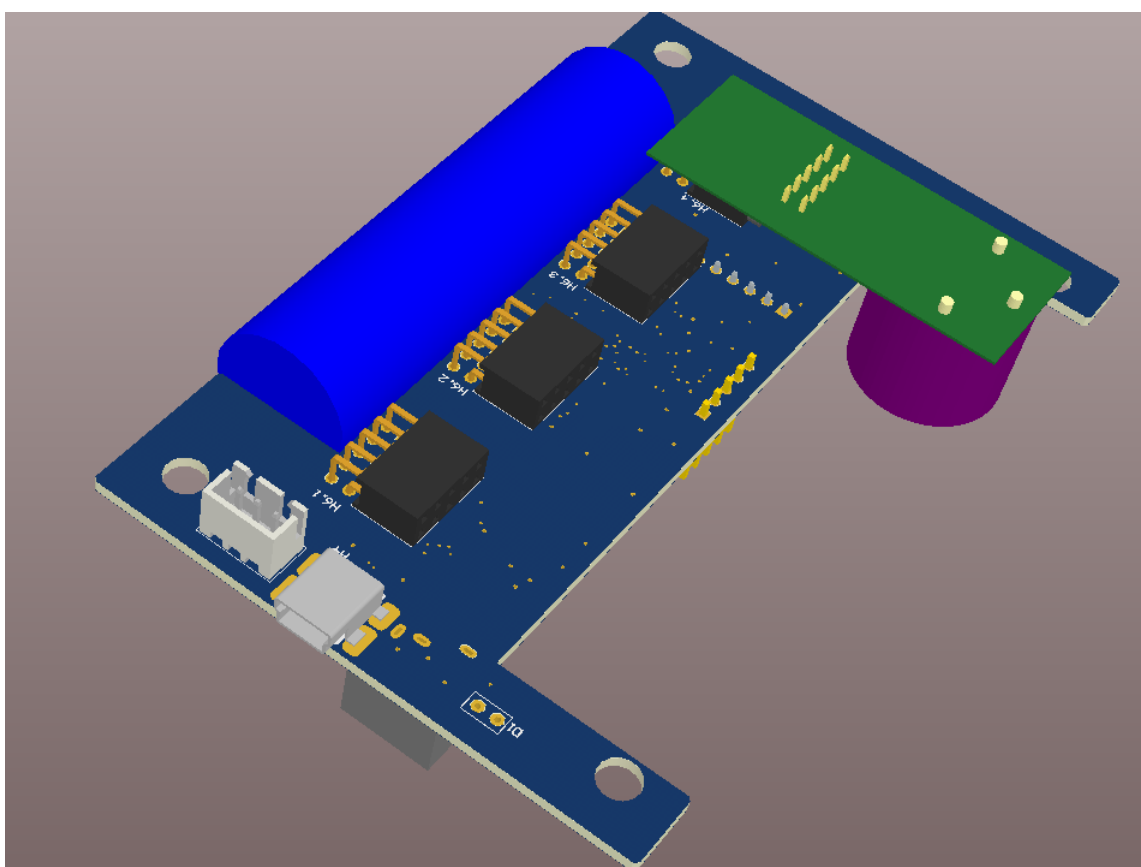
5.1 Návrh vyhodnocovací jednotky

Vyhodnocovací jednotka (obr. 5.1 a obr. 5.2) je řešena obdobným způsobem jako předchozí verze. Fyzické rozměry a rozmístění konektorů pro připojení měřících modulů zůstaly stejné, a to kvůli zachování kompatibility s montážní krabičkou. Blokové schéma jednotky je znázorněno na obr. 5.3. Celé schéma této jednotky je uvedeno v příloze B. Jednotka má několik funkčních bloků, které jsou popsány níže.

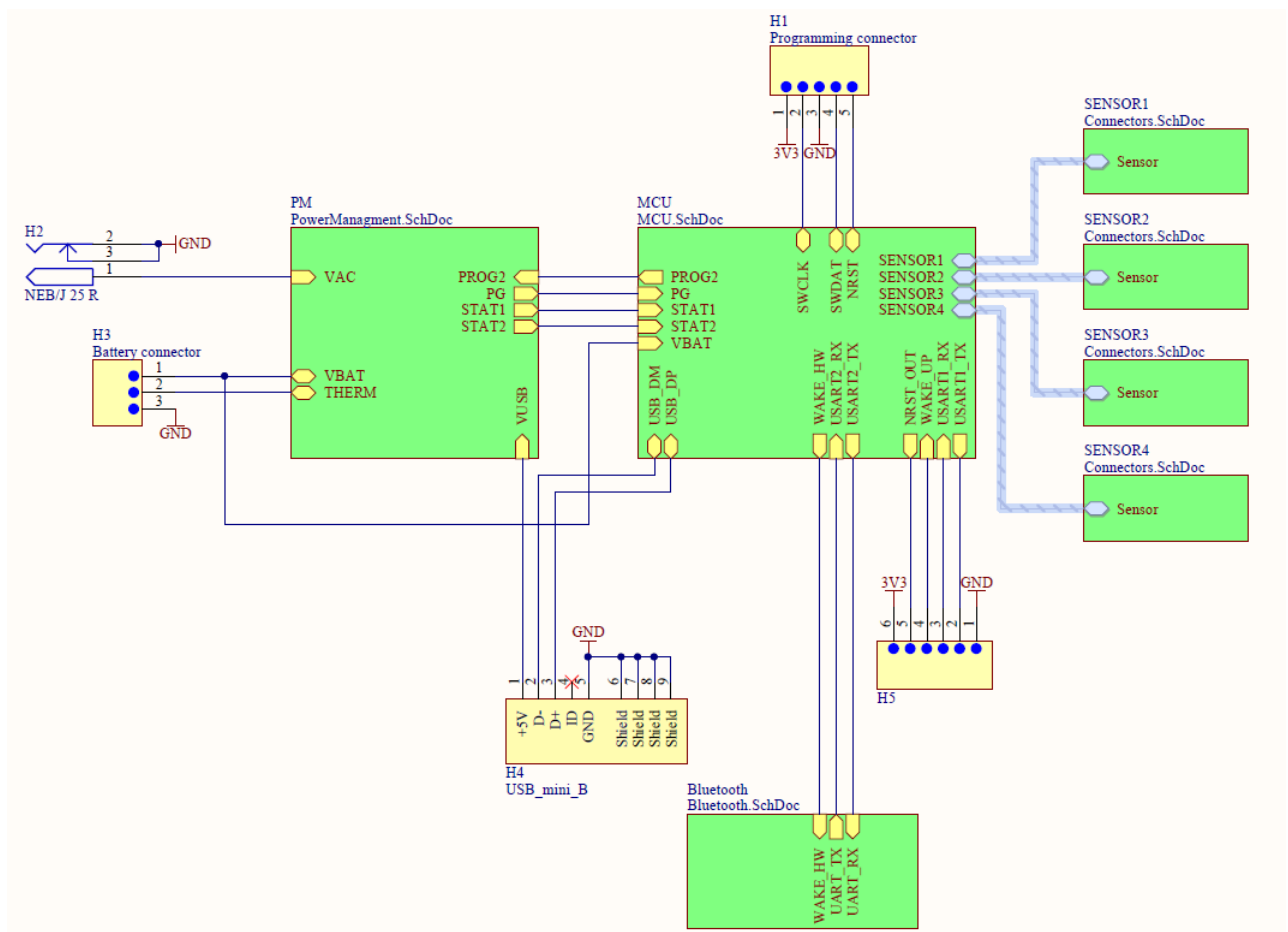
Hlavním blokem jednotky je blok MCU. Zde byla změna ve volbě jiného MCU. Volba se odvíjela na základě požadavku přímé komunikace MCU přes USB. Proto byla provedena rešerše *low cost* MCU od výrobce STMicroelectronics, které jsou dostupné na Farnell.



Obr. 5.1: 3D model vyhodnocovací jednotky - strana TOP



Obr. 5.2: 3D model vyhodnocovací jednotky - strana BOTTOM



Obr. 5.3: Blokové schéma vyhodnocovací jednotky

Jejich přehled je uveden v tab. 5.1. Základní kritéria pro výběr vhodného MCU byla: USB řadič, nízká cena a minimálně 32 pinů.

Označení výrobce	Obj. číslo	Flash paměť	SRAM paměť	Pouzdro	Cena (1)
STM32F042K4U6	2469552	16 kB	6 kB	UFQFN32	52,45 Kč
STM32F042K6T7	2469553	32 kB	6 kB	LQFP32	78,13 Kč
STM32F070RBT6	2488285	128 kB	16 kB	LQFP64	65,71 Kč
STM32F070C6T6	2488283	32 kB	6 kB	LQFP48	46,38 Kč
STM32F072CBT6	2432094	128 kB	16 kB	LQFP48	117,33 Kč

(1) Cena a dostupnost k datu 27.1.2015

Tab. 5.1: Přehled dostupných MCU na Farnell

Z těchto MCU byl vybrán STM32F072CBT6. Jeho výhodou je dostatečná rezerva ve velikosti programové paměti a patří do série *USB Line*, tzn. MCU nepotřebuje pro použití USB řadiče externí krystal (hodinový signál pro USB je odvozen přímo z HSI). Jeho hlavní parametry jsou uvedeny v tab. 5.2.

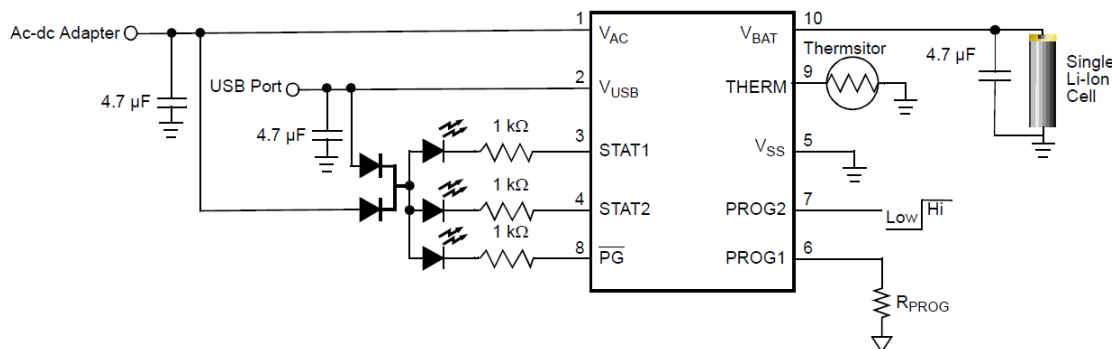
Flash paměť	128 kB
SRAM paměť	16 kB
Čítače	1 (16-bit, rozšířená funkčnost) 5 (16-bitový, obecné použití) 1 (32-bitový, obecné použití) 1 (16-bitový, základní)
Komunikační rozhraní	SPI, I2C, USART, USB
12-bitový ADC	1 (10 exter. kan., 3 inter. kan.)
12-bitový DAC	1
Analog. komparátor	2
Max. CPU frekvence	48 MHz
Pouzdro	LQFP48

Tab. 5.2: Přehled parametrů STM32F072CBT6

Při následující sériové výrobě by byl zřejmě použit jiný MCU, který by byl dostačující a zároveň levnější. Dále zde byl použit integrovaný obvod NUF2221W1 (ve schématu U2). Tento obvod je navržen pro USB komunikaci a slouží jako ESD ochrana, EMI filtr a terminátor.

Dalším důležitým blokem jednotky je blok PM (*Power Managment*) viz obr. B.2. Tato část zajišťuje napájení celého systému, nabíjení Li-Ion baterie a předává MCU informaci o stavu baterie (tato funkce nebyla v předchozí verzi implementována). Pro řízení nabíjení baterie byl zvolen integrovaný obvod MCP73837 a to z hlediska nižší ceny, lepší dostupnosti a vyšší obvodové jednoduchosti oproti dříve použitému BQ2403ARHLR. Je-

dinou nevýhodou je nižší maximální vstupní napětí (max. 6 V). Typické zapojení tohoto obvodu je na obr. 5.4. Hlavní parametry jsou uvedeny v tab. 5.3.



Obr. 5.4: Typické zapojení obvodu MCP73837

Max. proud z externího zdroje	1 A
Max. napětí externího zdroje	6 V
Proud z USB zdroje	100 mA, 500 mA (1)
Pouzdro	MSOP10

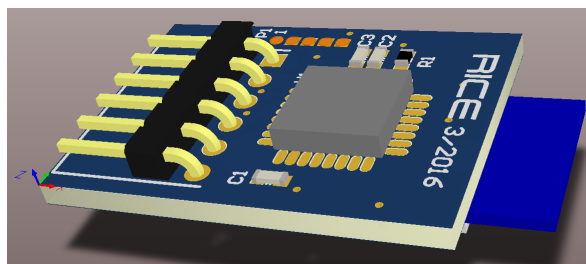
(1) Velikost je programovatelná napěťovou úrovní na vstupu PROG2

Tab. 5.3: Přehled parametrů MCP73837

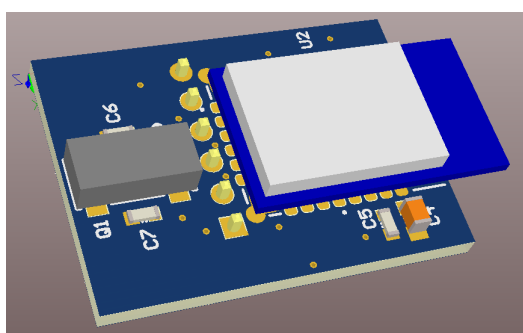
Obvod je dále doplněn o zapojení unipolárního tranzistoru typu P-MOS a Schottkyho diody. Toto zapojení odděluje přímé spojení baterie a napájení systému. Důvodem tohoto oddělení je správný nabíjecí cyklus baterie, zejména se jedná o konec cyklu nabíjení konstantním napětím. Pokud by byla baterie zatížena, byl by obvod *Power Managmentu* rovněž zatížen a ukončení fáze nabíjení by nenastalo (proud by neklesl pod stanovenou mez). Tranzistor tedy při připojení externího zdroje zajišťuje odpojení systému od baterie a energie je do systému dodávána přímo z tohoto zdroje. Více informací o této problematice je popsáno v [7].

Zapojení konektorů pro připojení měřících modulů (tzv. pinout) je uveden v příloze B.4. Pinout je od předchozí verze odlišný. Pin konektoru ID, který byl dříve využit pro identifikaci měřícího modulu je zde také (nevyužit, pouze pokud by nefungoval navržený postup identifikace), ale počítá se s identifikací dle dat uložených v EEPROM paměti modulu (úspora čtyř vstupů A/D převodníku MCU). Jednotka byla ještě doplněna o BT modul (blok Bluetooth). Tento modul není zatím osazen. Je to příprava na budoucí použití, kdy bude jednotka komunikovat s nadřazeným systémem přímo pomocí tohoto BT modulu bez nadřazené komunikační jednotky. Prozatím je na jednotce konektor (ve schématu H5), který slouží pro připojení komunikační jednotky. Schéma komunikační jednotky (uvedeno v příloze B) a komunikační protokol (který byl již popsán viz kapitola 4.4) nebyly v této práci řešeny. Součástí nového návrhu vyhodnocovací jednotky je však návrh

motivů desky plošných spojů a samotná realizace komunikační jednotky (obr. 5.5 a obr. 5.6). Při návrhu komunikační jednotky byl kladen důraz zejména na minimální rozměry DPS.



Obr. 5.5: 3D model komunikační jednotky - strana TOP



Obr. 5.6: 3D model komunikační jednotky - strana BOTTOM

5.2 Návrh měřících modulů

Nový návrh měřících modulů podléhal hlavně požadavku na použití senzorů plynů pro měření koncentrace v ppb (senzory mají odlišné fyzické uspořádání - *footprint*) a možnosti kalibrace více měřících modulů najednou. S tímto je spjato adresování obvodů v měřících modulech na sběrnici I2C. V předchozím případě měl každý obvod svou pevnou adresu a ve vyhodnocovací jednotce nemohlo být zasunuto více shodných modulů (při komunikaci po I2C by došlo ke kolizi). Proto bylo navrženo jiné adresování obvodů, to spočívá v programovatelné adrese každého obvodu pomocí signálu CS (na každý konektor je vyveden samostatný CS). Pokud je požadavek na komunikaci s měřícím modulem zapojeným např. v konektoru 1, signál CS na konektoru 1 má nízkou úroveň oproti ostatním. Tím jsou zajištěny odlišné adresy obvodů na tomto měřícím modulem vůči ostatním. Přehled jednotlivých adres obvodů je uveden v tab. 5.4.

5.2.1 Měřící modul pro elektrochemický senzor

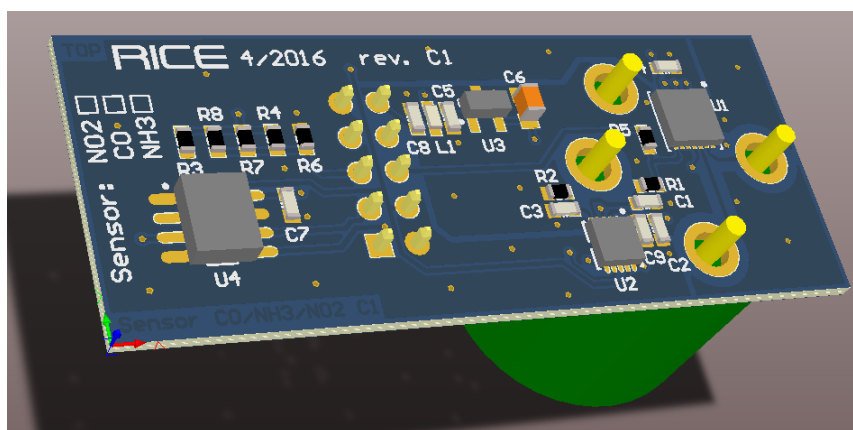
Schéma obvodu pro tento typ senzoru je téměř shodné s předchozí verzí. Schéma je uvedeno v příloze B. Změny ve schématu byly provedeny za účelem zjednodušení obvodového

Obvod	Adresa	
	Aktivní	Neaktivní
	Komunikační stav modulů	
AT24C02D (EEPROM)	0xA8	0xAC
LTC2485 (ADC)	0x28	0x4C
LMP91000 (AFE)	0x90 (1)	0x90 (1)
MCP4561-103E (DIGIPOT)	0x5E	0x5C

(1) Adresa je pevná, volba obvodu je pomocí vstupu CS

Tab. 5.4: Adresace obvodů na sběrnici I2C

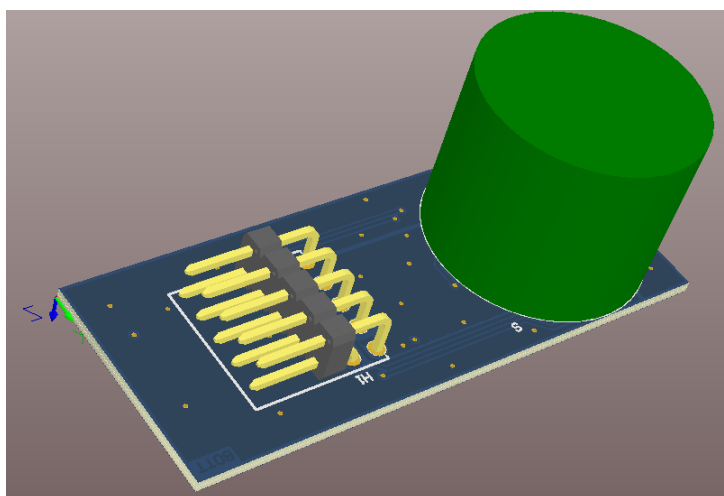
zapojení nebo kvůli lepší dostupnosti některých součástek. Hlavním cílem nového návrhu (mimo jiné adresaci popsané výše) bylo použití citlivějších senzorů, které jsou schopny detekovat koncentraci plynu v řádech ppb, jedná se o desítky až stovky. Jelikož odezva na změnu koncentrace je velmi malá (podrobněji uvedeno níže) je zde velký problém s rušením. A to jak s vlastním šumem senzoru, tak vnějším elektromagnetickým zářením. Proto byla velká pozornost věnována návrhu motivu DPS s důrazem na EMC odolnost. Tomu odpovídá optimální rozmístění součástek a čtyřvrstvá DPS. Kde vnitřní vrstvy jsou napájecí (3,3 V a zem). Tyto vrstvy jsou pak ještě fyzicky rozděleny na analogovou a digitální část. Návrh měřicího modulu je pak zobrazen na obr. 5.7 a 5.8. Dále je pro představu v tab. 5.5 uveden přehled parametrů elektrochemického senzoru pro měření koncentrace plynu CO v ppb od výrobce Alphasense. Z něhož vyplývá již výše zmíněná relativně nízká odezva a šum senzoru.



Obr. 5.7: 3D model měřicího modulu pro elektrochemický senzor - strana TOP

5.2.2 Měřicí modul pro katalytický senzor

Při návrhu tohoto měřicího modulu (obr. 5.9 a obr. 5.10) byla provedena zejména změna v adresaci digitálně řízeného potenciometru (opět podléhá hodnotě signálu CS na konektoru vyhodnocovací jednotky). Dále bylo zjednodušeno obvodové zapojení oproti minulé



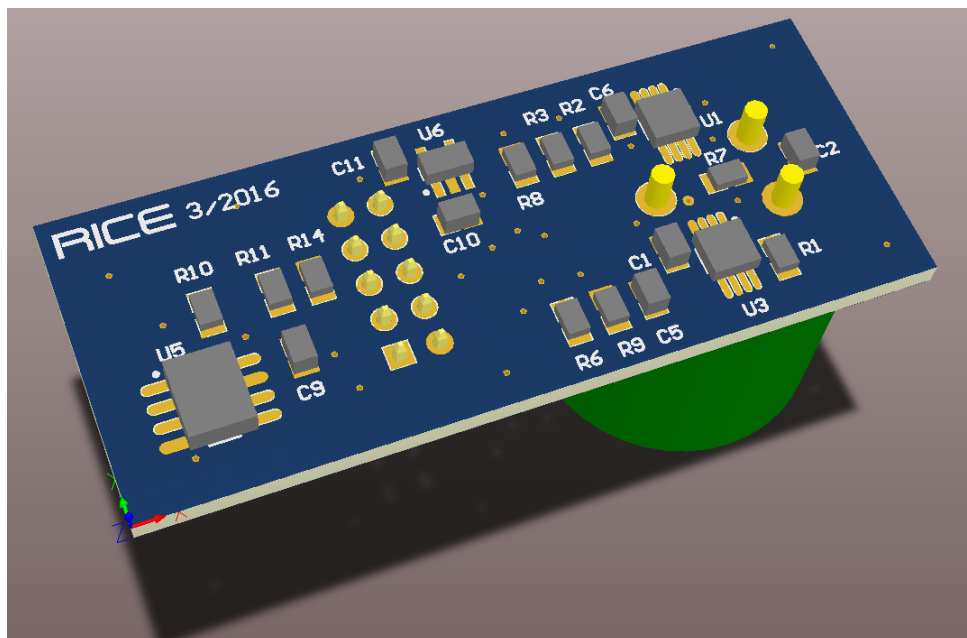
Obr. 5.8: 3D model měřícího modulu pro elektrochemický senzor - strana BOTTOM

Parametr	Hodnota
Citlivost	220 až 375 nA/ppm při 2 ppm CO
Čas odezvy	< 20 s od 0 do 10 ppm CO
Nulový proud	-100 až +10 nA ve vzduchu při 20°C
Šum (1)	20 ppb
Max. koncentrace	500 ppm
Linearita	< ±1 ppm v celém rozsahu měření
Teplotní rozsah	-30 až +50 °C
Tlak prostředí	80 až 120 kPa
Relativní vlhkost prostředí	15 až 90 %

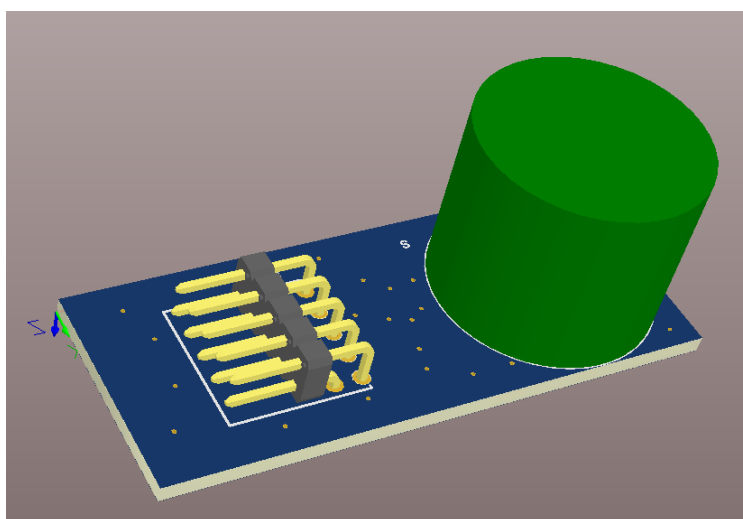
(1) Měřeno s Alphasense AFE nízkošumovým obvodem

Tab. 5.5: Přehled parametrů senzoru CO-A4 pro měření koncentrace plynu CO v ppb [15]

variantě. Je zde absence A/D převodníku. Výstupní napětí senzoru, potažmo podpůrné měřicí elektroniky je měřeno interním A/D převodníkem v MCU, a to z důvodu relativně velké odezvy na změnu (velikost) koncentrace plynu. Není tu problém s rušením EMC. Schéma měřicího modulu je uvedeno v příloze B.



Obr. 5.9: 3D model měřicího modulu pro katalický senzor - strana TOP

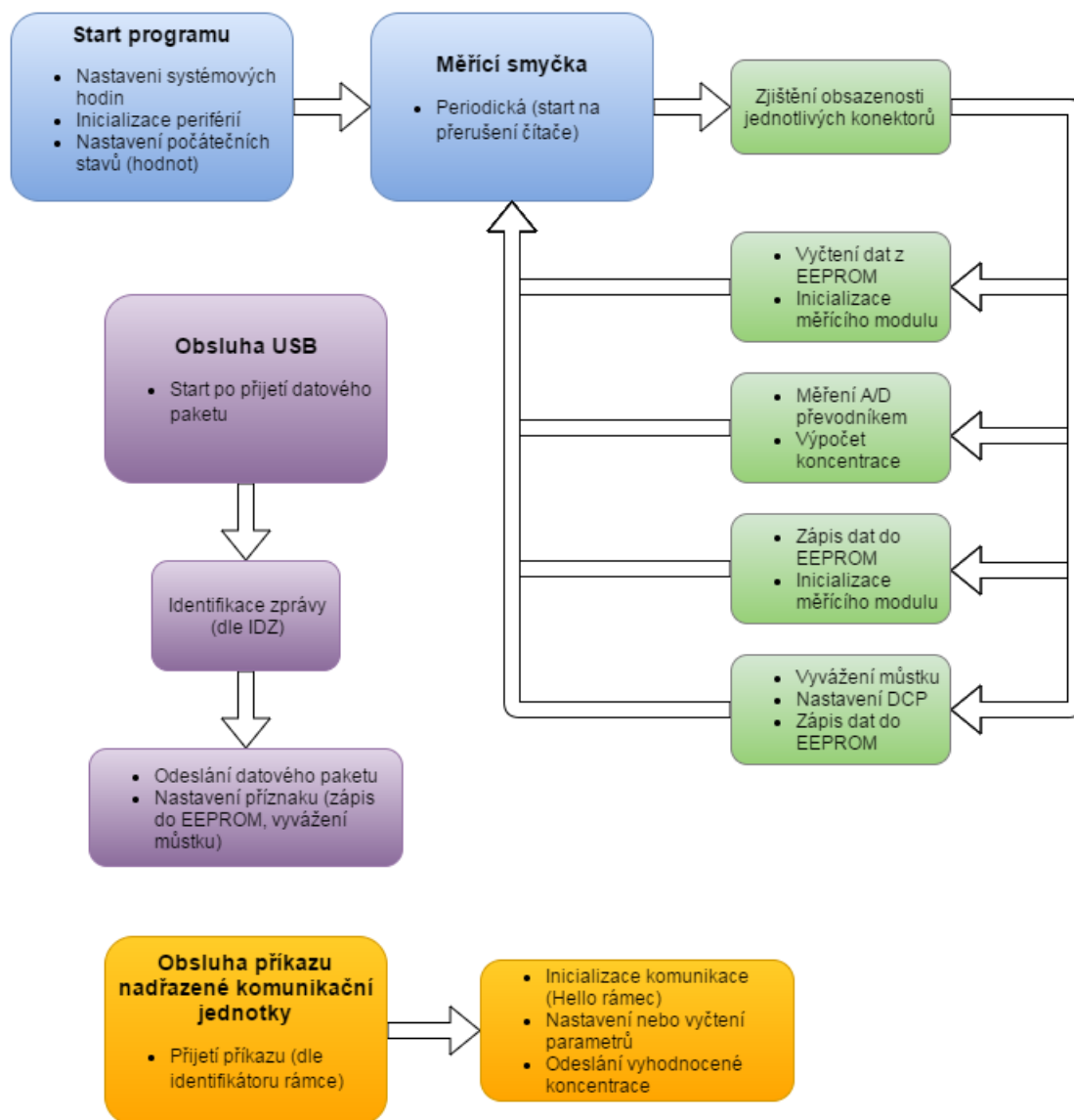


Obr. 5.10: 3D model měřicího modulu pro katalický senzor - strana BOTTOM

5.3 Program pro vyhodnocovací jednotku

Program pro vyhodnocovací jednotku doznal velkých změn. Vývojový diagram programu je znázorněn na obr. 5.11. Hlavní změna je implementace USB komunikace, která umož-

ňuje přímé připojení jednotky do PC. Pro tuto funkci je ideální použít třídu CDC (*Communication Device Class*), tzn. po zapojení jednotky do PC se zobrazí jednotka jako COM port. Poté lze vcelku jednoduše vysílat a přijímat data mezi jednotkou a PC. K této komunikaci je poté navržena desktopová aplikace pro nastavení měřících modulů a jejich kalibraci, která je popsána v následující kapitole.



Obr. 5.11: Vývojový diagram programu

Na startu programu zprvu proběhne nastavení hodinových domén, inicializace periférií a nastavení počátečních stavů proměnných. Využité periférie MCU jsou:

- GPIO
- ADC
- CRC
- I2C

- TIM
- USART
- USB

Poté je periodicky vykonávána hlavní měřicí smyčka (perioda měření je závislá na periodě přetečení časovače). Jak již bylo zmíněno, pro identifikaci jednotlivých modulů není využito napěťového děliče jako v předchozí verzi, ale identifikace se provádí podle určitých dat uložených v EEPROM paměti každého modulu (celková struktura dat bude uvedena níže v tab. 5.6). Ještě než začne samotné vyčítání dat z EEPROM paměti, musí být zjištěno zda je v konektoru modul vůbec zasunut. To je prováděno tak, že porty na kterých jsou signály CS1 až CS4, jsou nastaveny jako vstupy a poté čteny. Po zjištění obsazenosti konektorů nastane inicializace měřícího modulu, měření koncentrace, zápis nových dat do EEPROM paměti nebo vyvážení můstku s digitálním potenciometrem. V jedné měřicí periodě však může nastat pouze jedna z těchto možností. To záleží na příznaku (globální proměnná), který indikuje, zda byl modul nově zasunut, či vypojen nebo se do příznaku uloží požadavek z USB komunikace (zápis nových dat do EEPROM paměti, vyvážení můstku). V měřicí smyčce se také měří napěťová úroveň baterie (zatím nevyužito). Struktury datových paketů, které jsou použity pro USB komunikaci a princip výměny dat mezi jednotkou a PC jsou uvedeny v následující kapitole. Dále je zde opět implementován komunikační protokol s nadřazenou jednotkou (přes USART), který byl použit a odzkoušen v předchozí verzi.

Adresa bytu v EEPROM	Význam obsahu EEPROM
0x00	Typ senzoru
0x01 - 0x02	Identifikační číslo
0x10	Den výroby
0x11	Měsíc výroby
0x12	Rok výroby (-2000)
0x20	Den kalibrace
0x21	Měsíc kalibrace
0x22	Rok kalibrace (-2000)
0x23 - 0x24	Platnost kalibrace (počet dní)
0x30	Relativní vlhkost [%] (1)
0x31	Průtok plynu [l/min] (1)
0x40 - 0x43	Kalibrační koeficient A (2)
0x44 - 0x47	Kalibrační koeficient B (2)
0x50	TIACN/DCP registr (3)
0x51	REFCN registr (3)
0x52	MODECN registr (3)

(1) Okolní podmínky při kalibraci měřících modulů

(2) Kalibrační koeficienty jsou typu float (rozděleny do čtyř bytů)

(3) Registry obvodu LMP91000 nebo digitálního potenciometru

Tab. 5.6: Přehled uložených dat v paměti EEPROM

6

Program pro kalibraci měřících modulů

V této kapitole je popsán návrh programu pro kalibraci a nastavení měřících modulů a komunikace programu s vyhodnocovací jednotkou (struktura datových rámců). V závěru kapitoly je provedeno otestování kalibračního programu.

6.1 Návrh programu pro kalibraci a nastavení měřících modulů

Program byl vytvořen v jazyce C#. Jako vývojové prostředí je použito Microsoft Visual Studio 2012. Při návrhu programu byly brány v potaz tyto požadavky:

- Komunikace po sériové lince
- Kalibrace a nastavení čtyř modulů najednou
- Zobrazení dat v EEPROM paměti modulů
- Změna a zápis dat do EEPROM paměti modulů
- Při kalibraci modulů vykreslovat hodnoty A/D konverzí
- Vyvážení můstku s katalytickým senzorem a digitálním potenciometrem

Dále byl program vylepšen o možnost doplnění počátečních hodnot (jsou poté uloženy do EEPROM paměti modulů), a to kvůli usnadnění (zrychlení) nastavení nových měřících modulů. Při samotné kalibraci jsou z jednotky periodicky (perioda je 1 s) vyčítány hodnoty A/D konverzí (dle datových rámců, popsány níže). Kalibrace se provádí pro několik hodnot koncentrací plynů. Poté je pomocí lineární regrese (metoda nejmenších čtverců) proveden výpočet kalibračních koeficientů pro jednotlivé měřící moduly.

Nyní jsou zde uvedeny jednotlivé kroky pro zobrazení dat zasunutých měřících modulů:

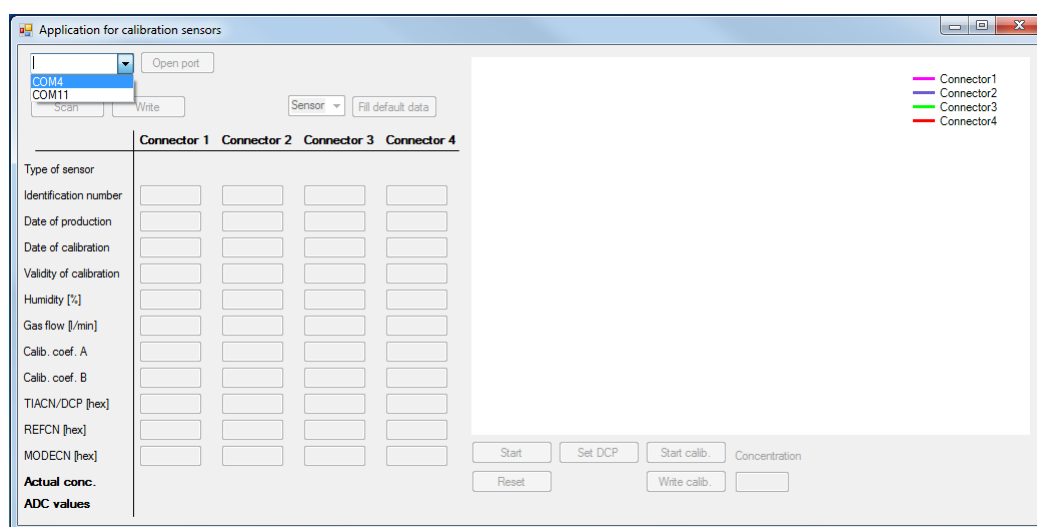
- a) Výběr daného COM portu (v menu se zobrazí všechny dostupné COM porty, obr. 6.1)
- b) *Open port* - otevře komunikační sériovou linku
- c) *Scan* - načte a zobrazí data zasunutých měřících modulů (obr. 6.2)

Dále je možné zahájit kalibraci nebo nastavit počáteční hodnoty modulů. Pro nastavení počátečních hodnot se zvolí z rolovacího menu typ měřícího modulu a potvrdí tlačítkem *Fill default data*. Hodnoty jsou poté zobrazeny v daných textových polích a nechájí se ještě změnit přímo. Pro zápis hodnot do EEPROM paměti modulů je nutné potvrdit tlačítkem *Write*. Doplnění počátečních hodnot řeší:

- Automatické číslování měřících modulů (Identification number)
- Automatické doplnění data výroby (Date of production)
- Platnost kalibrace (Validity of calibration)
- Kalibrační podmínky (Humidity, Gas flow)
- Automatické doplnění registrů (TIACN, REFCN, MODECN), dle typu měřícího modulu

Nyní je zde popsán postup kalibrace měřících modulů. Pokud se provádí kalibrace modulů s katalytickým senzorem, je nutné nejprve vyvážit můstek (tlačítko *Set DCP*). Tato operace trvá několik sekund, během vyvažování svítí na vyhodnocovací jednotce červená LED dioda. Poté je hodnota digitálního potenciometru uložena do EEPROM paměti modulu (zjištění této hodnoty se provede tlačítkem *Scan*). Dále může být provedena samotná kalibrace, která je pro všechny měřící moduly shodná. Postup kalibrace:

- a) Vyhodnocovací jednotka se zasunutými měřícími moduly se vloží do kalibrační komory



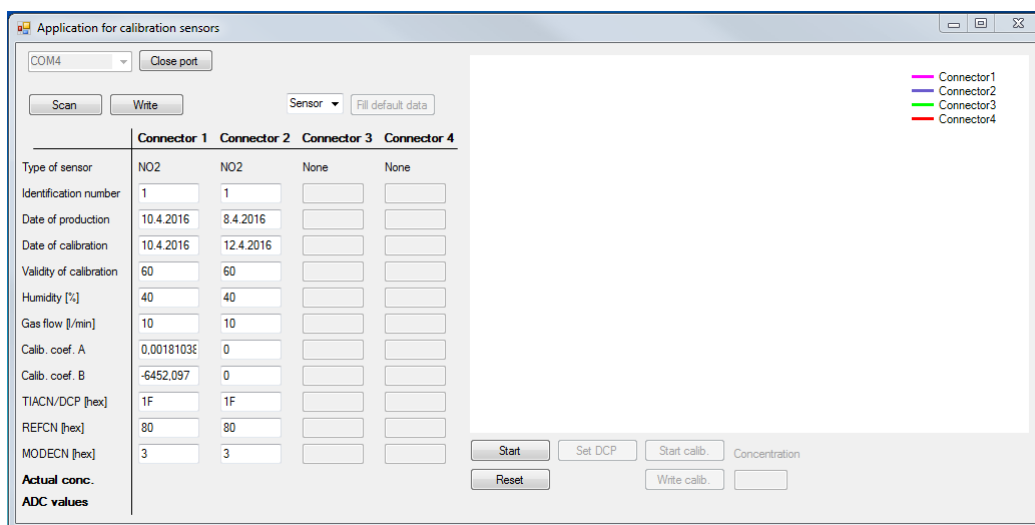
Obr. 6.1: Ukázka kalibračního programu před otevření komunikační linky

- b) Poté se pustí (technický) vzduch s nulovou koncentrací daného plynu, dle zadaného průtoku a relativní vlhkosti
- c) V programu se stiskne tlačítko *Start*, na grafu je vidět vývoj hodnot A/D konverzí v závislosti na čase
- d) Po ustálení hodnot A/D konverzí se zadá nastavená koncentrace a stiskne tlačítko *Start calib.*
- e) Po několika sekundách se stiskne totéž tlačítko (*Stop calib.*)
- f) Bod **d)** a **e)** se opakuje pro několik hodnot koncentrací, poté tlačítkem *Write calib.* je proveden výpočet kalibračních koeficientů a zobrazení hodnot v textových polí, automaticky je doplněno i datum kalibrace
- g) Pro uložení kalibračních dat se stiskne tlačítko *Write*

Pokud se požaduje nová kalibrace, stiskne se tlačítko *Reset*. Při kalibraci jsou ještě zobrazovány vyhodnocené koncentrace z aktuálních kalibračních koeficientů a přímý výpis hodnot A/D konverzí. Pro ukončení programu je nutné zavřít sériovou linku (tlačítko *Close port*).

6.2 Komunikace programu s vyhodnocovací jednotkou

Pro komunikaci mezi PC a vyhodnocovací jednotkou byly navrženy datové rámce, které jsou popsány níže. Princip komunikace je na principu dotaz → odpověď. PC je v tomto případě *Master* a vyhodnocovací jednotka *Slave*. Jsou zde čtyři typy zpráv:



Obr. 6.2: Ukázka kalibračního programu se zasunutými měřícími moduly

- Vyčti data z měřicího modulu
- Zapiš data do měřicího modulu
- Vyčti hodnotu A/D konverze a vyhodnocené koncentrace
- Požadavek na vyvážení můstku (nastavení DCP)

Každá zpráva je rozlišena identifikátorem zprávy (první byte), který je označen IDZ. V tab. 6.1 je uveden celkový přehled IDZ.

Identifikátor zprávy IDZ	Hodnota (1)
Vyčti data	0x01 - 0x14
Zapiš data	0x11 - 0x14
Vyčti hodnotu	0x21 - 0x24
Vyvážení můstku	0x31 - 0x34

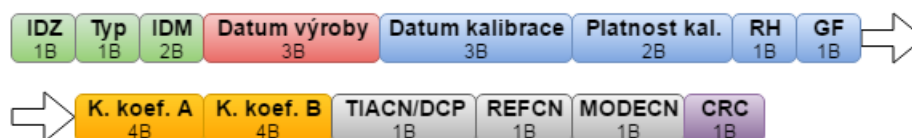
(1) Hodnota pro měřicí modul v konektoru 1 až 4

Tab. 6.1: Přehled identifikátorů zpráv

Pro výčet dat z jednoho měřicího modulu je z kalibračního programu odeslán požadavek do vyhodnocovací jednotky. Vyhodnocovací jednotka pošle dotazovaná data. Struktura datových rámců je zobrazena na obr. 6.3 a na obr. 6.4. Pro zápis dat do EEPROM paměti měřicího modulu je použit totožný datový rámec jako na obr. 6.4, liší se pouze IDZ. Pokud je požadavek na vyčtení hodnot, je datový rámec shodný s rámcem na obr. 6.3 (IDZ dle tab. 6.1). Vyhodnocovací jednotka pošle hodnotu A/D konverze a vypočítané koncentrace, rámec je zobrazen na obr. 6.5. Posledním typem zprávy je požadavek na vyvážení můstku. Při tomto požadavku kalibrační program odešle datový rámec, který je na obr. 6.3 (IDZ dle tab. 6.1). Všechny datové rámce jsou zabezpečeny 8-bitovým CRC.



Obr. 6.3: Struktura datového rámce - požadavek (příkaz) ze strany kalibračního programu



Obr. 6.4: Struktura datového rámce - data pro čtení nebo zápis z/do EEPROM paměti měřicího modulu

Položka Typ v datovém rámci určuje typ měřicího modulu. Jeho hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.2.

Typ měřicího modulu v konektoru	Hodnota
Konektor neobsazen	0x00
Modul pro měření NO ₂	0x01
Modul pro měření CH ₄	0x02
Modul pro měření NH ₃	0x03
Modul pro měření CO	0x04
Modul pro měření SO ₂	0x05
Typ modulu neidentifikován	0xFF

Tab. 6.2: Identifikace měřicího modulu

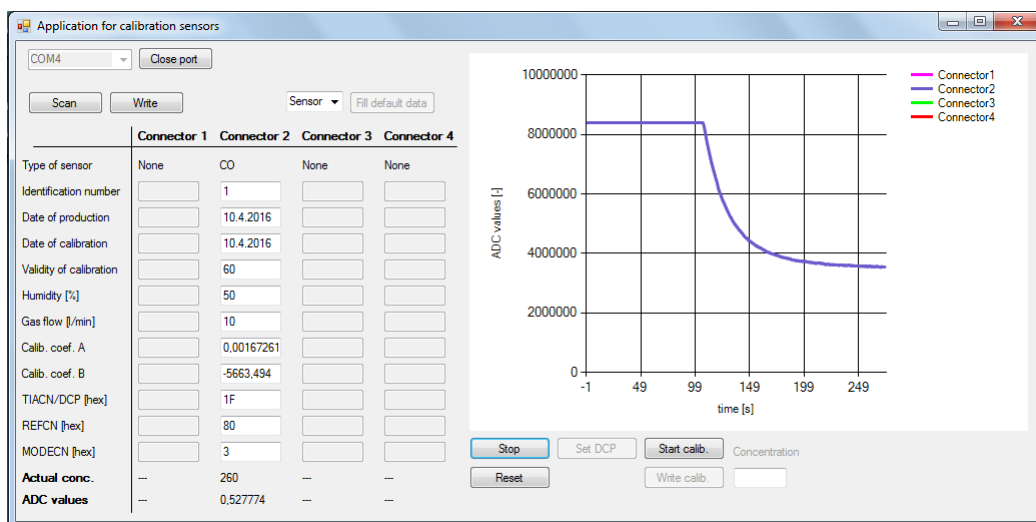
Pro komunikaci vyhodnocovací jednotky s PC je nutné, aby v PC byl nainstalován USB ST Virtual COM port ovladač. Tento ovladač je dostupný z www.st.com pod názvem STSW-STM32102 (sekce STM32 Utilities).

6.3 Otestování kalibračního programu

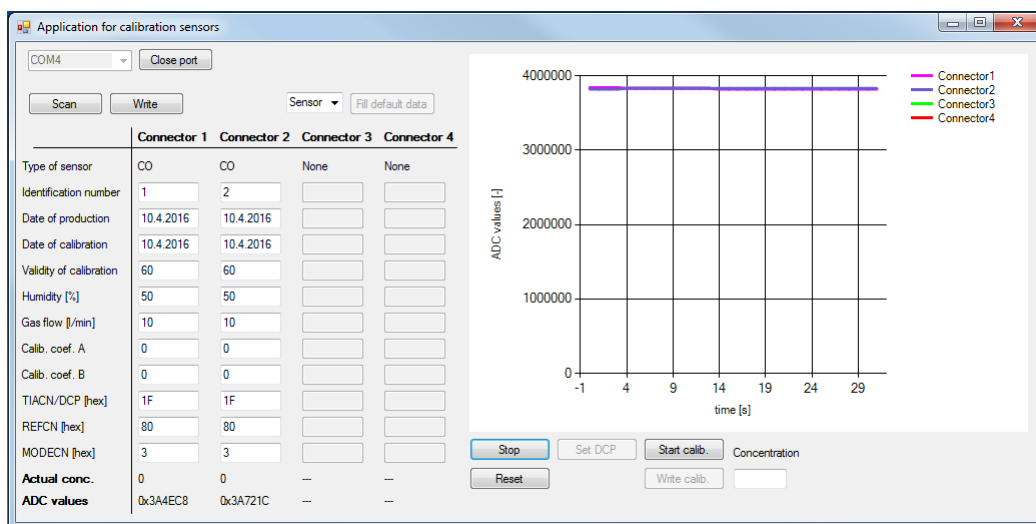
V této části je ukázáno testování funkčnosti programu pro kalibraci měřících modulů. Na obr. 6.6 je vyobrazen časový průběh A/D konverzí nového senzoru pro měření koncentrace plynu CO. Je zde patrné, že nový senzor vyžaduje určitý čas, než se jeho výstupní hodnota ustálí na dané úrovni. Při tomto čase dochází k tzv. formování elektrolytu. Na obr. 6.7 je zobrazen průběh hodnot A/D konverzí dvou měřících modulů při nulové koncentraci. Prozatím byl kalibrován pouze jeden měřící modul, a to z důvodu jednoho nástavce, který spojuje senzor a kalibrační komůrku. Časový průběh kalibrace měřicího modulu je vyobrazen na obr. 6.8. Průběh kalibrace odpovídá koncentracím v tab. 6.3. Po vypočtení a uložení kalibračních koeficientů byl proveden obdobný průběh daných koncentrací, aby se zjistila odchylka nastavené a vyhodnocené koncentrace. V tomto rozsahu měření byla odchylka menší než 30 ppb. Problém nepřesnosti měření a poté vyhodnocení dané koncentrace způsobuje samotný šum senzoru. Vliv tohoto šumu se nechá částečně eliminovat průměrováním hodnot A/D konverzí. Průměrování hodnot bude záležitostí programu vyhodnocovací jednotky. Pro průměrování bude použita metoda klouzavého průměru, délka průměrování bude stanovena experimentálně.



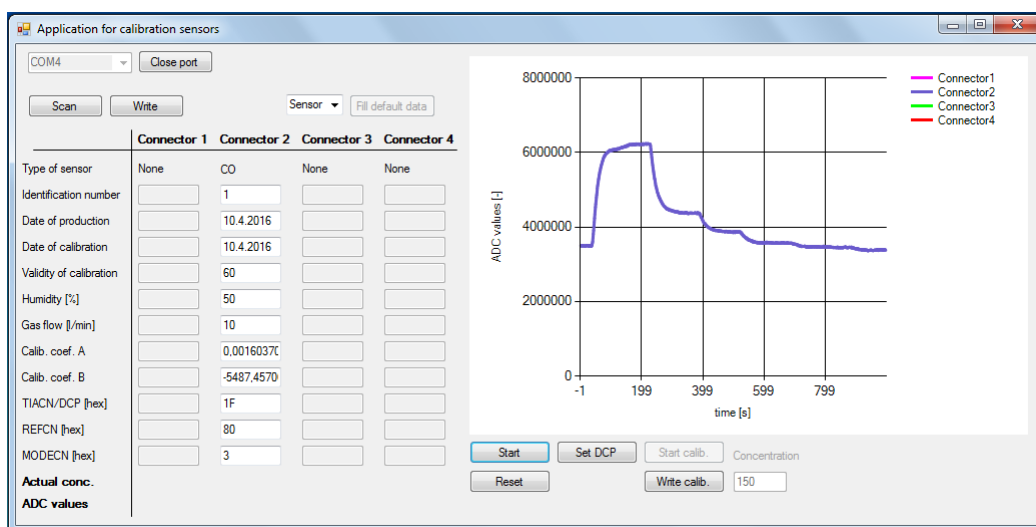
Obr. 6.5: Struktura datového rámce - hodnota A/D konverze a vypočítané koncentrace



Obr. 6.6: Časový průběh A/D konverzí nového senzoru



Obr. 6.7: Časový průběh A/D konverzí dvou měřících modulů při nulové koncentraci



Obr. 6.8: Časový průběh kalibrace měřícího modulu

Nastavená koncentrace
0 ppm
4,5 ppm
1,5 ppm
750 ppb
300 ppb
150 ppb
0 ppm

Tab. 6.3: Hodnoty nastavených koncentrací plynu CO pro kalibraci měřících modulů

7

Závěr

V kapitole 2 byl vysvětlen princip typů senzorů, které byly pro vyhodnocení koncentrace daných plynů použity, dále byly uvedeny skutečné vlastnosti senzorů obou typů a shrnuty jejich výhody a nevýhody. Pro představu byl ještě zmíněn přehled limitních koncentrací daných plynů pro vnitřní prostory budov.

Kapitola 3 se zabývala popisem stávajícího řešení (prototypu) vyhodnocovací jednotky a měřících modulů. Dále jsou zde uvedeny výpočty, které souvisí s měřením koncentrace plynu senzory a nastavením podpůrné měřící elektroniky jednotlivých senzorů. Hlavní nevýhodou tohoto prototypu, byla nemožnost kalibrace více schodných měřících modulů najednou, a to z důvodu pevné adresace obvodů (I2C) na měřících modulech. Tento problém byl řešen v kap. 5.

Návrh programu pro vyhodnocovací jednotku, komunikaci s měřícími moduly a nadřazenou komunikační jednotkou byl proveden v kap. 4. Vyhodnocovací jednotka obstarává počáteční nastavení měřících modulů dle dat uložených v EEPROM paměti každého modulu, vyčítání měřených hodnot a vyhodnocení koncentrace. Vyhodnocení, respektive výpočet koncentrace probíhá pomocí kalibračních koeficientů. Kalibrace je nutná vzhledem k rozdílné citlivosti senzorů a odlišné výstupní hodnotě při nulové koncentraci plynu. Další část programu řeší komunikaci s nadřazenou komunikační jednotkou. Předává jí informace o měřících modulech, vyhodnocené koncentrace a některé provozní parametry. Je zde ještě implementována komunikace s PC, kde byla použita periférie UART. Pomocí této komunikace probíhala kalibrace měřících modulů a nastavení dat, které jsou uloženy v EEPROM paměti jednotlivých modulů. Při samotné komunikaci bylo nutné použít externí převodní UART/USB. Přímá komunikace vyhodnocovací jednotky s PC přes USB byla řešena v kap. 5.

V kapitole 5 je uveden vlastní návrh a realizace vyhodnocovací jednotky. Při tomto návrhu byl kladen důraz na přímou komunikaci jednotky s PC přes sběrnici USB a možnost kalibrace až čtyř schodných měřících modulů najednou. Proto byl pro novou vyhodnocovací jednotku vybrán mikrokontrolér STM32F072CBT6, který patří do řady *USB Line*. Tzn. obsahuje USB řadič a nevyžaduje pro tuto komunikaci externí krystal. Dále bylo nutné navrhnout nové měřící moduly. A to z důvodu použití citlivějších senzorů, které

jsou schopny měřit koncentrace plynu v řádech desítek ppb a jiného systému adresace (I2C), která podporuje možnost zasunutí více schodných modulů najednou. Samotný návrh plošného spoje pro měřicí moduly podléhal požadavkům na elektromagnetickou odolnost, tzn. aby vliv elektromagnetického rušení byl na měření výstupní veličiny senzoru co nejnižší (velmi malá citlivost senzoru).

Kapitola 6 obsahuje popis návrhu a funkce aplikace pro kalibraci měřících modulů, vyčítání a ukládání dat do EEPROM paměti modulů. Byla zde navržena sada komunikačních protokolů, pomocí kterých probíhají příkazy a výměna dat mezi vyhodnocovací jednotkou a aplikací. Aplikace přehledně zobrazuje údaje o zasunutých měřících modulech. Při kalibračním procesu vykresluje časový průběh měřených hodnot jednotlivých modulů, zobrazuje aktuální měřené hodnoty a vyhodnocenou koncentraci plynu. Tento poslední údaj je pak použit pro ověření správnosti kalibrace.

V závěru diplomové práce, kde se provádělo ověření funkčnosti celého zařízení a kalibrační aplikace se narazilo na problém s kolísáním měřené hodnoty na výstupu elektrochemického senzoru. Tento fakt poté ovlivňuje přesnost kalibrace, potažmo i správné vyhodnocení koncentrace plynu. Proto byl do programu pro vyhodnocovací jednotku implementován MA filtr, který průměruje naměřené hodnoty. V testovacím režimu byl počet průměrovaných hodnot zatím nastaven na dvacet konverzí A/D převodníku. Tento počet je kompromis mezi dynamikou vyhodnocení a potlačení šumu senzoru.

Následné vylepšení vyhodnocovací jednotky by mělo zohledňovat teplotní závislost sensorů. Jelikož se citlivost senzoru s teplotou mění, zejména to platí u elektrochemických sensorů, mělo by být samotné vyhodnocení koncentrace tomu uzpůsobeno. Tzn. měření teploty okolí a přepočítání koncentrace dle změřené teploty.

Na základě výše uvedeného je možné konstatovat, že všechny cíle jež byly uvedeny v zadání jsou splněny.

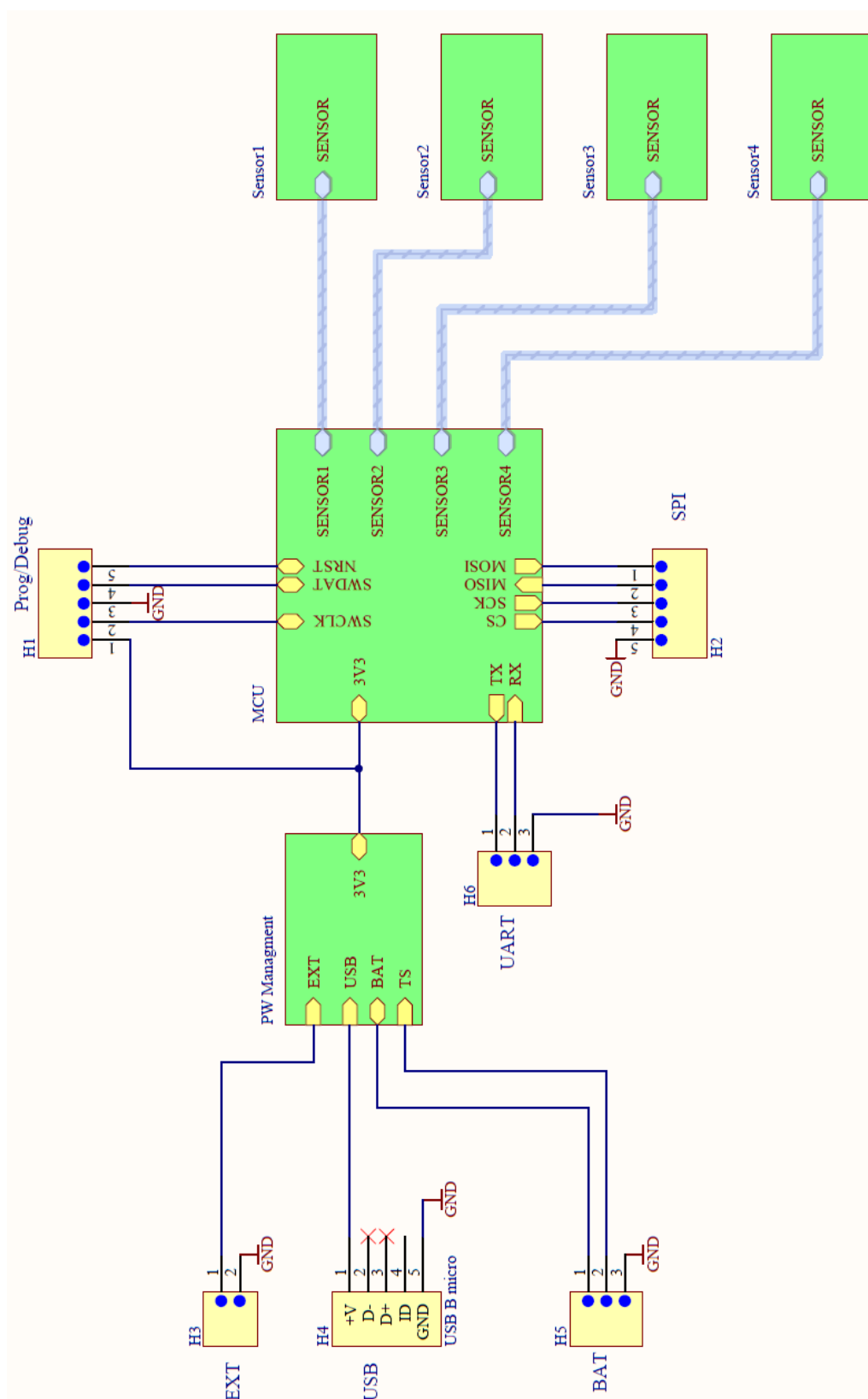
Literatura

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. Moderní učebnice elektroniky. Praha. ISBN 978-80-7300-240-4.
- [2] KREIDL, Marcel. Senzory a měřicí obvody. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2057-6.
- [3] SEDLÁČEK, Miloš. Zpracování signálů v měřicí technice. Vyd. 2. Praha: České vysoké učení technické, 1998.
- [4] ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin: vysokoškolská příručka pro vysoké školy technického směru. 2., upravené a dopln. vyd. Praha: SNTL, 1983. Automatizace a regulace.
- [5] Katalytické spalování: Detekce a analýza plynů. Chromservis [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <https://www.chromservis.eu/c/catalytic?lang=CZ>
- [6] ANN 104: How electrochemical gas sensors work. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-01-02]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/application-notes>
- [7] AN1149: Design A Load Sharing System Power Path Management with Microchip's Stand-Alone Li-Ion Battery Charger. In: Microchip [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwAppNotes/AppNotes>
- [8] LMP91000: Configurable AFE Potentiostat for Low-Power Chemical Sensing Applications. In: Texas Instruments [online]. [cit. 2016-03-08]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product>
- [9] CO-AX: Carbon Monoxide Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [10] CH-A3: Combustible Gas Pellistor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-03]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [11] SO2-A4: Sulfur Dioxide Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>

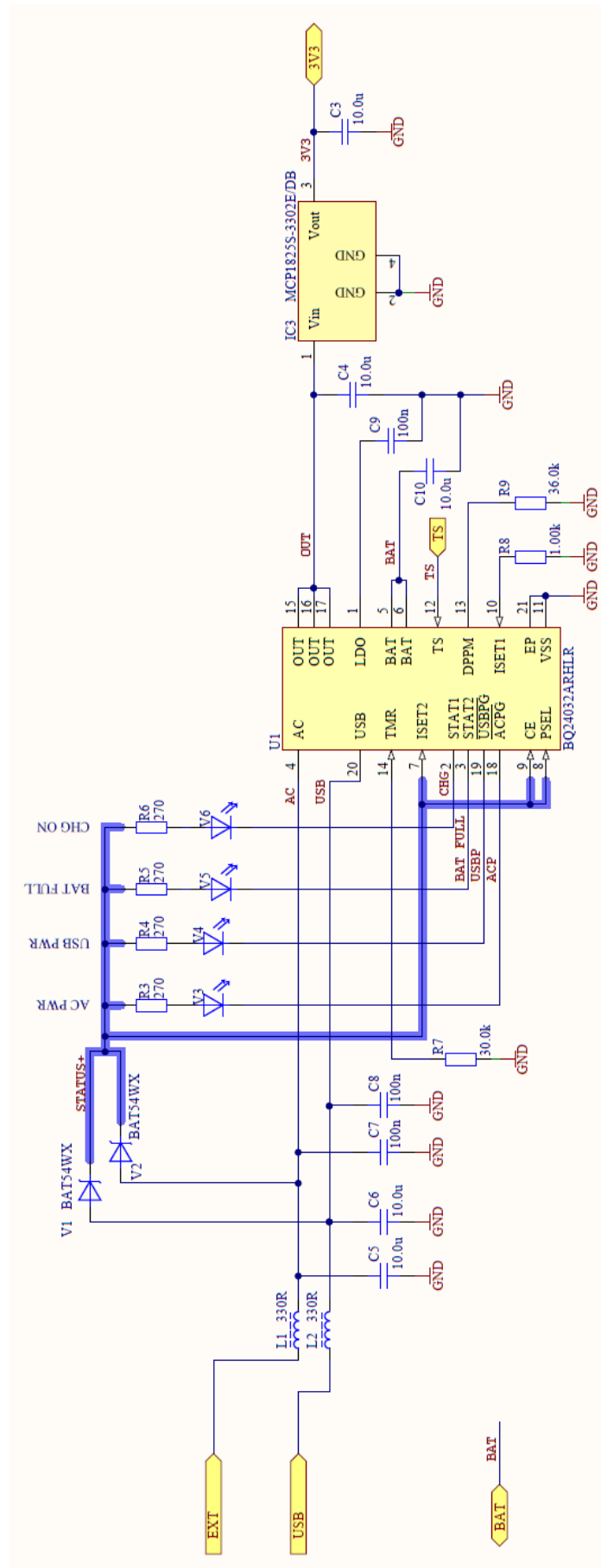
- [12] NO2-A42F: Nitrogen Dioxide Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [13] NO2-A1: Nitrogen Dioxide Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [14] OX-A421: Oxidising Gas Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-05]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [15] CO-A4: Carbon Monoxide Sensor. In: Alphasense [online]. [cit. 2016-02-04]. Dostupné z: <http://www.alphasense.com/index.php/safety/downloads>
- [16] Sensoric NH3 3E 500 SE. In: City Technology [online]. [cit. 2016-02-08]. Dostupné z: <http://www.citytech.com/sensor/ammonia>

Příloha A

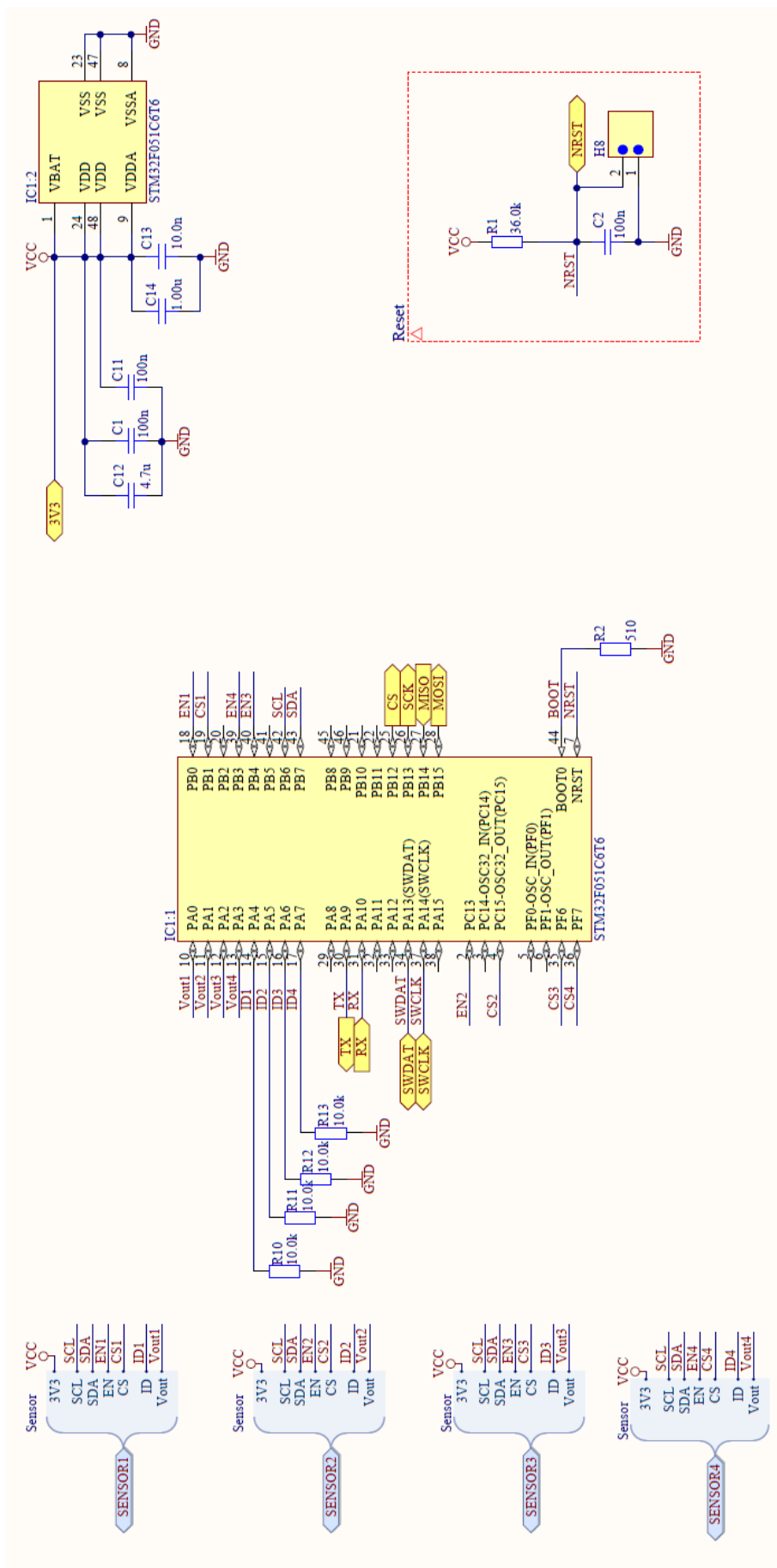
Schémata zapojení - prototypy



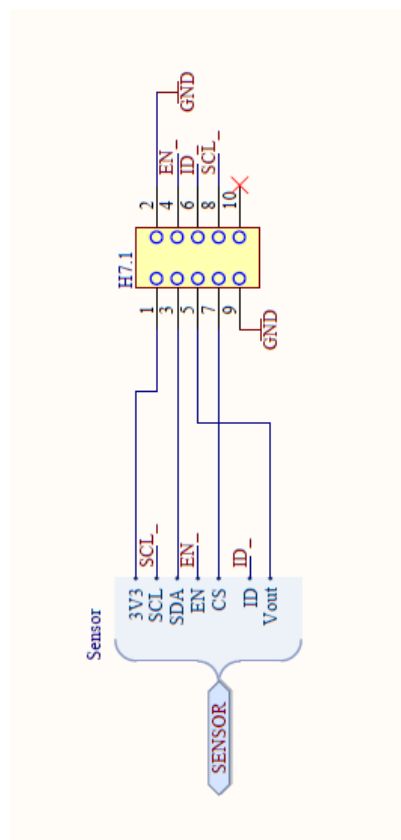
Obr. A.1: Blokové schéma vyhodnocovací jednotky



Obr. A.2: PW Management



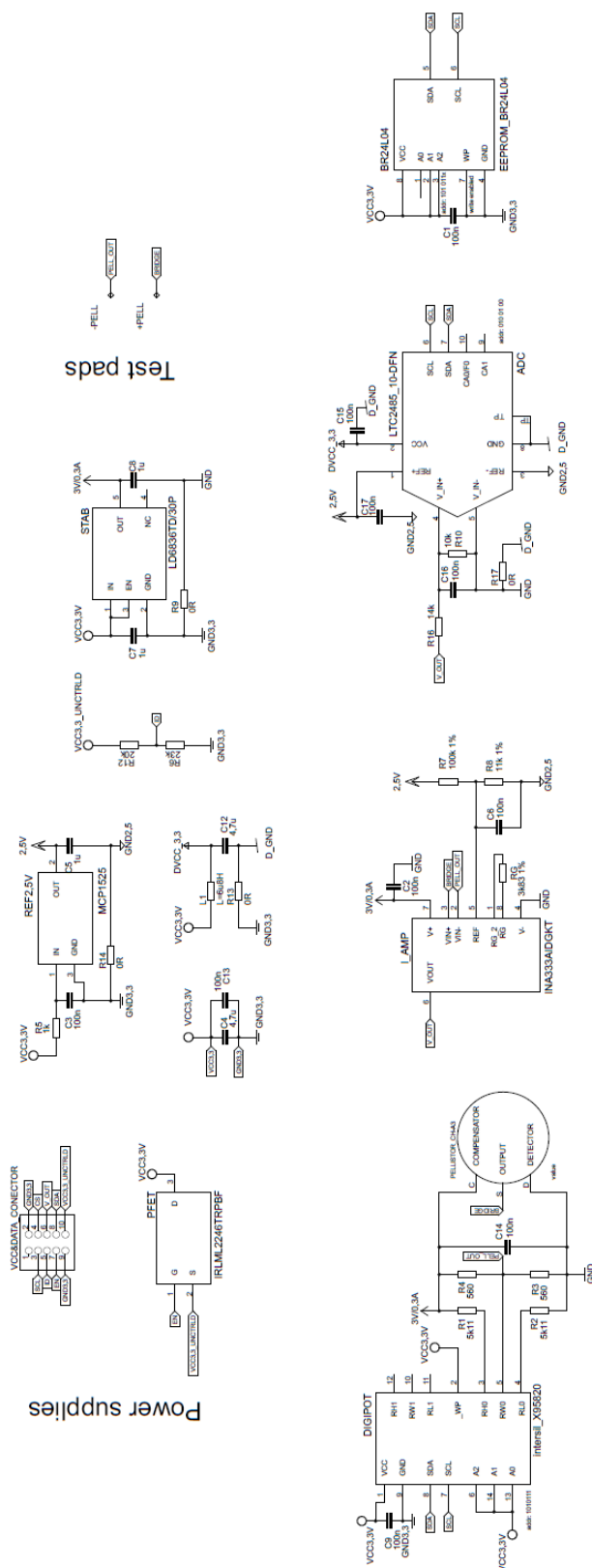
Obr. A.3: MCU

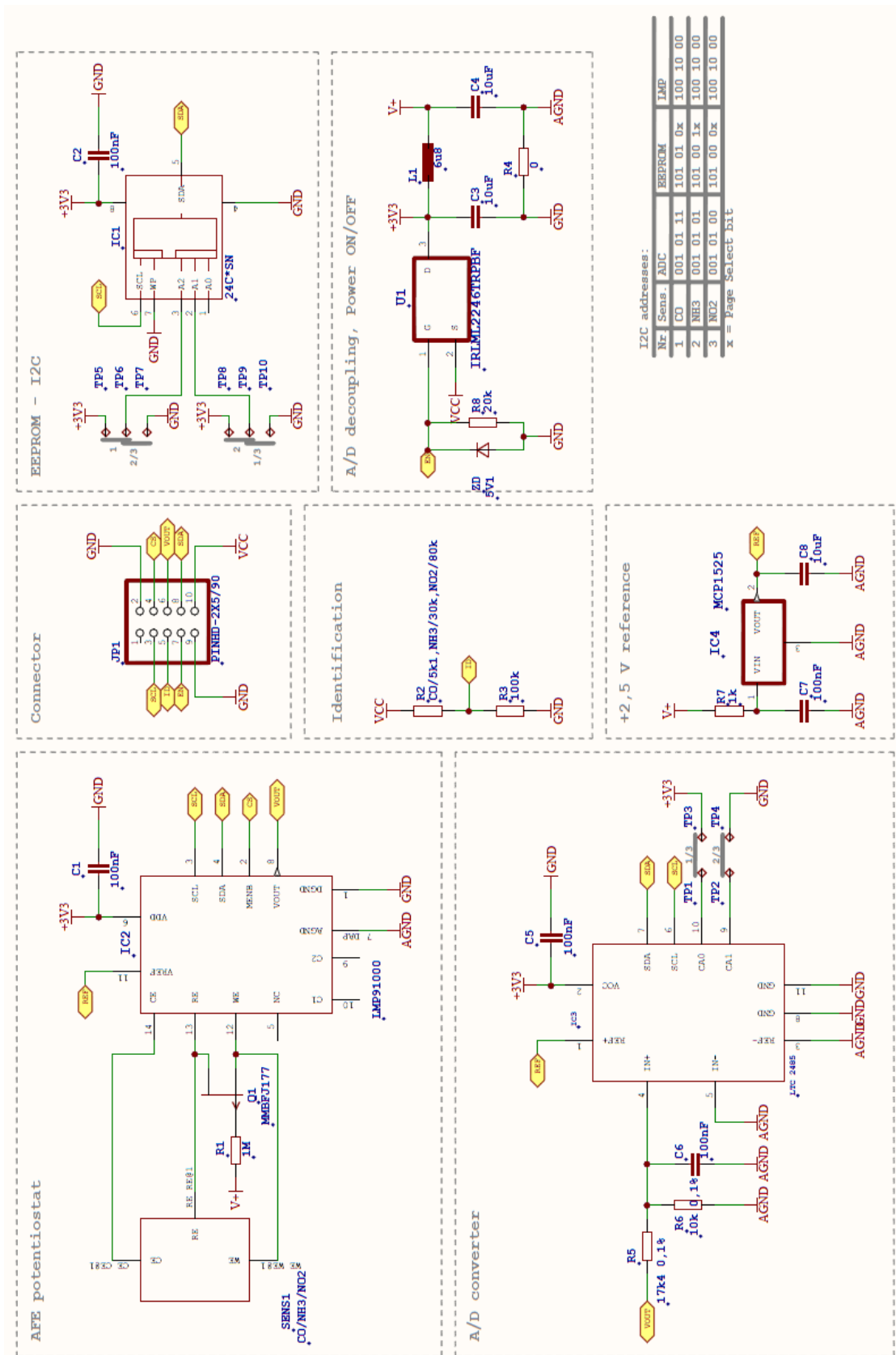


Obr. A.4: Sensor

Obr. A.5: Schéma měřicího modulu pro měření katalytickým senzorem

Electronics for measuring

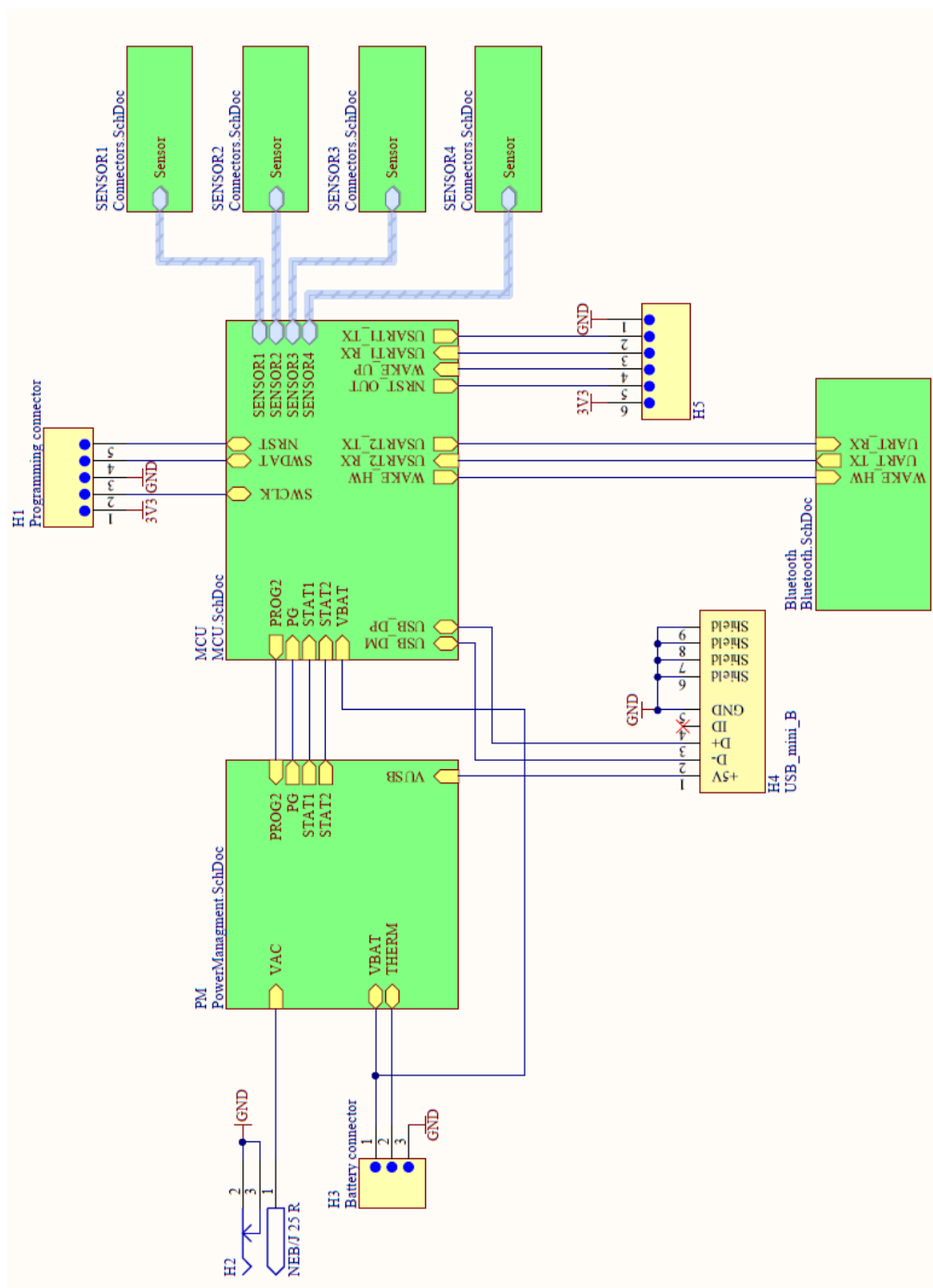




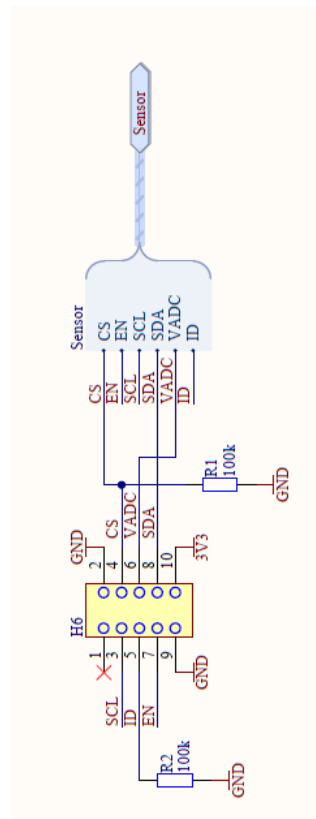
Obr. A.6: Schéma měřicího modulu pro měření elektrochemickým senzorem

Příloha B

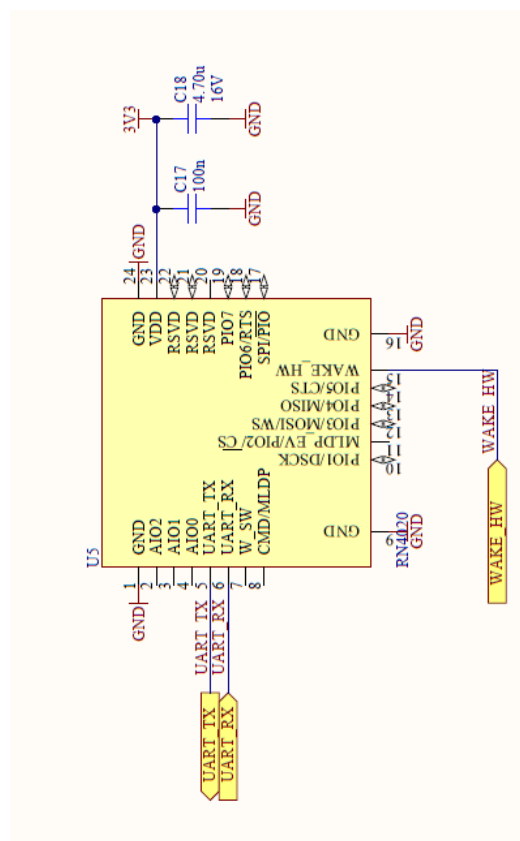
Schémata zapojení - nové návrhy



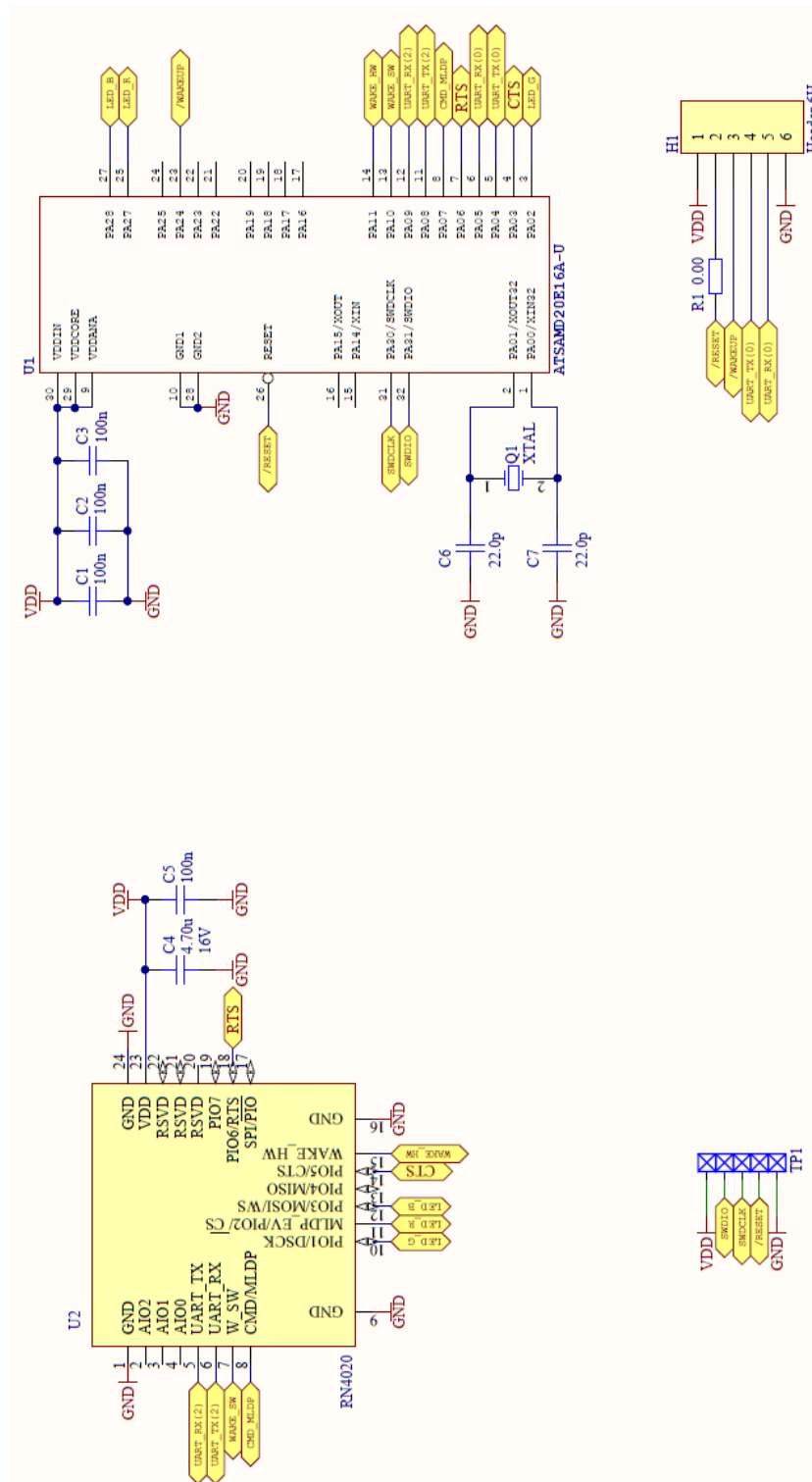
Obr. B.1: Blokové schéma vyhodnocovací jednotky



Obr. B.4: Connectors



Obr. B.5: Bluetooth



Obř. B.8: Schéma nadřazené komunikační jednotky