

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

Žhavené polovodičové senzory pro měření koncentrace plynů  
Semiconductor Type Gas Sensors

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Koloušek**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika  
Téma: **Žhavené polovodičové senzory pro měření koncentrace plynů**  
**Semiconductor Type Gas Sensors**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

1. Seznámení se s technologií měření koncentrace plynů pomocí žhavených polovodičových senzorů.
2. Návrh a realizace systému pro měření koncentrace vybraných plynů včetně zpracování a vizualizace dat.
3. Implementace navrženého systému do demonstrační a výukové úlohy.
4. Zhodnocení dosažených výsledků a závěr.

### Seznam doporučené odborné literatury:

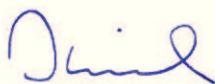
- [1] HAASZ, Vladimír a Miloš SEDLÁČEK. *Elektrická měření, přístroje a metody*. Praha: Česká technika-nakladatelství ČVUT, 2005. 337 s. ISBN 80-01-02731-7.
- [2] SYDENHAM, Peter a Richard THORN.(eds.) *Handbook of Measuring System Design*. Wiley, 2005. 1648s. ISBN 978-0-470-02143-9.
- [3] MARTINEK, Radislav. *Senzory v průmyslové praxi*. 1. vyd. Praha: BEN- technická literatura, 2004. 199 s. ISBN 80-7300-114-4.
- [4] TGS 2611 *www.figarosensor.com* [online]© 2015. Dostupné z <http://www.figarosensor.com/products/docs/TGS%202611C00%281013%29.pdf>
- [5] TGS 2442 *www.figarosensor.com* [online]© 2015. Dostupné z [http://www.soselectronic.com/a\\_info/resource/c/figaro/TGS2442.pdf](http://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/figaro/TGS2442.pdf)
- [6] TGS 4161 *www.figarosensor.com* [online]© 2015. Dostupné z [http://www.soselectronic.cz/a\\_info/resource/c/figaro/tgs4161.pdf](http://www.soselectronic.cz/a_info/resource/c/figaro/tgs4161.pdf)

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Radovan Hájovský, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016



doc. Ing. Jiří Koziorek, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“



.....  
Bc. Michal Koloušek

V Ostravě dne: 29. 4. 2016

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Radovanu Hájovskému, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

## **Abstrakt**

Cílem diplomové práce je návrh a realizace měřicího systému pro měření koncentrace oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a metanu v ovzduší. Naměřené hodnoty ze senzorů jsou teplotně kompenzovány a vizualizovány v programu Matlab. Měřicí systém je založený na platformě Arduino využívající mikrokontroléry od firmy Atmel.

Měřicí systém je především určený jako výuková pomůcka, která demonstruje možnosti měření koncentrace plynů elektrochemickými a žhavenými polovodičovými senzory. Sensory jsou použity od firmy Figaro USA Inc.

## **Klíčová slova**

Matlab, oxid uhelnatý, oxid uhličité, metan, měřicí systém, Arduino, Figaro, TGS2442, TGS4161, TGS2611, TGS5042, elektrochemický senzor, žhavený polovodičový senzor

## **Abstract**

The object of this thesis is the design and implementation of measurement system for measuring the concentration of carbon monoxide, carbon dioxide and methane in the atmosphere. Measured data from sensors are temperature compensated and visualized in Matlab. The measuring system is based on the Arduino platform using the Atmel microchips. The measuring system is primarily intended as a teaching tool that demonstrates the measurement of gas concentrations electrochemical sensors and semiconductor sensors. Sensors are used from Figaro USA, Inc.

## **Key words**

Matlab, carbon monoxide, carbon dioxide, methane, measuring system, Arduino, Figaro, TGS2442, TGS4161, TGS2611, TGS5042, electrochemical sensor, semiconductor sensor

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam ilustrací	8
Seznam tabulek	9
Úvod	10
1 Teoretický úvod	11
1.1 Žhavené polovodičové senzory	11
1.2 Elektrochemické senzory	12
1.3 Nebezpečné vlastnosti CO, CO <sub>2</sub> a metanu	13
2 Analýza HW prvků měřicího systému	15
2.1 Řídicí jednotka	15
2.2 Senzory	17
2.2.1 Měření CO	17
2.2.2 Měření CH <sub>4</sub>	21
2.2.3 Měření CO <sub>2</sub>	24
2.2.4 Měření CO elektrochemickým senzorem	26
2.2.5 Měření teploty	30
2.3 Zobrazovací jednotka	31
3 HW návrh měřicího systému	32
3.1 Řídicí a sensorový modul	33
3.1.1 Připojení řídicí jednotky	33
3.1.2 Připojení LCD displeje	35
3.1.3 Připojení ovládacích prvků a ventilátoru	36
3.1.4 Připojení senzorů	37
3.1.5 Zapojení propojovacího konektoru	43
3.2 Mechanická konstrukce výukového modelu	44
4 SW návrh měřicího systému	46
4.1 Řídicí software pro měření CO	47
4.2 Řídicí software pro měření CO <sub>2</sub>	47
4.3 Řídicí software pro měření metanu	48
5 Kalibrace měřicího systému	49
5.1 Kalibrace senzoru TGS2611	49
5.2 Kalibrace senzoru TGS4161	50
5.3 Kalibrace senzoru TGS2442	50
5.4 Kalibrace senzoru TGS5042	51
6 Vizualizace	53
6.1 UML diagram cyklu měření vizualizace	54
6.2 Export naměřených dat	55
7 Nejistoty měření a statistika	56
7.1 Nejistota měření senzoru TGS2442	59
7.2 Nejistota měření senzoru TGS5042	62
7.3 Nejistota měření senzoru TGS4161	64
7.4 Nejistota měření senzoru TGS2611	66

Závěr .....	68
Použitá literatura .....	70
Seznam příloh.....	72

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\text{Al}_2\text{O}_3$	Oxid hlinitý
CO	Oxid uhelnatý
$\text{CO}_2$	Oxid uhličitý
DMV	Dolní mez výbušnosti
EMF	Elektromotorická síla (volt)
GUI	Grafické uživatelské rozhraní
HMI	Rozhraní mezi člověkem a strojem
HMV	Horní mez výbušnosti
$\text{CH}_4$	Metan
$\text{In}_2\text{O}_3$	Oxid inditý
K	Termodynamická teplota (Kelvin)
LCD	Displej z tekutých krystalů
LED	Dioda emitující světlo
LSB	Nejméně významný bit
NTC	Negastor
PTC	Pozistor
PWM	Pulzně šířková modulace
$\text{RuO}_2$	Oxid rutheničitý
SCADA	Supervizní řízení a sběr dat
$\text{SnO}_2$	Oxid cíničitý
$\text{TiO}_2$	Oxid titaničitý
UML	Grafický jazyk pro vizualizaci
ZnO	Oxid zinečnatý
eV	Elektronvolt (joule)
ppm	Částic na jeden milion



## Seznam ilustrací

Obr. 1 Základní uspořádání senzoru [1].....	11
Obr. 2 Vliv kyslíku na senzor [2].....	11
Obr. 3 Vliv redukčního plynu na senzor [2].....	12
Obr. 4 Princip palivového článku [4].....	12
Obr. 5 Blokové schéma návrhu ideové HW části .....	15
Obr. 6 Arduino Uno [7].....	15
Obr. 7 Senzor TGS2442 [9] .....	17
Obr. 8 Struktura senzoru TGS2442 [9] .....	18
Obr. 9 Měřicí cyklus TGS2442 [9] .....	18
Obr. 10 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS2442 [9].....	19
Obr. 11 Graf koncentrace CO v ovzduší pro různé poměry $R_S/R_O$ .....	20
Obr. 12 Výpočet koeficientů polynomu senzoru TGS2442 .....	20
Obr. 13 Dva konstrukční typy senzoru TGS2611 [10] .....	21
Obr. 14 Struktura senzoru TGS2611 [10] .....	22
Obr. 15 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS2611 [10].....	22
Obr. 16 Graf koncentrace CH <sub>4</sub> v ovzduší pro různé poměry $R_S/R_O$ .....	23
Obr. 17 Senzor TGS4161 [12] .....	24
Obr. 18 Struktura snímacího prvku senzoru TGS4161 [12] .....	25
Obr. 19 Základní schéma zapojení měřicího obvodu a s TGS4161 [12] .....	25
Obr. 20 Graf koncentrace CO <sub>2</sub> pro různá elektromotorická napětí .....	26
Obr. 21 Senzor TGS5042 [14] .....	27
Obr. 22 Struktura senzoru TGS5042 [14] .....	27
Obr. 23 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS5042 [14].....	27
Obr. 24 Graf koncentrace CO v ovzduší pro výstupní proud ze senzoru.....	28
Obr. 25 Výpočet koeficientů polynomu senzoru TGS5042 .....	29
Obr. 26 Termistor [16] .....	30
Obr. 27 Závislost odporu na teplotě NTC termistoru.....	30
Obr. 28 LCD displej MC1602E-SBL/H [18] .....	31
Obr. 29 Blokové schéma měřicího systému .....	32
Obr. 30 Sestavený řídicí modul.....	33
Obr. 31 Sestavený senzorový modul.....	33
Obr. 32 Zapojení jednotlivých pinů řídicí jednotky .....	34
Obr. 33 Zapojení LCD displeje .....	35
Obr. 34 Schéma zapojení ovládajícího tlačítka.....	36
Obr. 35 Schéma zapojení ovládání ventilátoru .....	37
Obr. 36 Schéma zapojení konektoru pro RESET.....	37
Obr. 37 Schéma zapojení senzoru TGS2442.....	38
Obr. 38 Průběh spínací sekvence .....	39
Obr. 39 Detail spínání .....	39
Obr. 40 Schéma zapojení senzoru TGS2611.....	40
Obr. 41 Schéma zapojení senzoru TGS4161.....	41
Obr. 42 Schéma zapojení senzoru TGS5042.....	42
Obr. 43 Schéma zapojení NTC termistoru .....	42

Obr. 44 Schéma zapojení vývodů konektoru .....	43
Obr. 45 Panel s přidělanou elektronikou .....	44
Obr. 46 Plynová komora .....	45
Obr. 47 Finální verze měřicího systému .....	45
Obr. 48 Vývojové prostředí ARDUINO .....	46
Obr. 49 Úvodní obrazovka CO senzoru .....	47
Obr. 50 Obrazovka displeje v měřicím režimu CO senzoru .....	47
Obr. 51 Úvodní obrazovka CO <sub>2</sub> senzoru .....	47
Obr. 52 Obrazovka displeje v měřicím režimu CO <sub>2</sub> senzoru .....	48
Obr. 53 Úvodní obrazovka CH <sub>4</sub> senzoru .....	48
Obr. 54 Obrazovka displeje v měřicím režimu CH <sub>4</sub> senzoru .....	48
Obr. 55 Kalibrační křivka senzoru TGS2611 .....	49
Obr. 56 Kalibrační křivka senzoru TGS4161 .....	50
Obr. 57 Kalibrační křivka senzoru TGS2442 .....	51
Obr. 58 Rozptyl hodnot senzoru TGS2442 [9] .....	51
Obr. 59 Kalibrační křivka senzoru TGS5042 .....	52
Obr. 60 Hlavní vizualizační obrazovka .....	53
Obr. 61 UML diagram měřicího cyklu vizualizace .....	54
Obr. 62 Příklad uložených dat v Excelu .....	55
Obr. 63 Normální rozdělení [19] .....	58
Obr. 64 Graf normálního rozdělení senzoru TGS2442 .....	61
Obr. 65 Graf normálního rozdělení senzoru TGS5042 .....	63
Obr. 66 Graf normálního rozdělení senzoru TGS4161 .....	65
Obr. 67 Graf normálního rozdělení senzoru TGS2611 .....	67

## Seznam tabulek

Tab. 1 Vliv CO na zdraví člověka [5] .....	13
Tab. 2 Vliv CO <sub>2</sub> na zdraví člověka [6] .....	14
Tab. 3 Technické specifikace platformy Arduino Uno [7] .....	16
Tab. 4 Základní parametry A/D převodníku [8] .....	16
Tab. 5 Popis jednotlivých pinů řídicí jednotky .....	34
Tab. 6 Popis pinů LCD displeje .....	35
Tab. 7 Popis jednotlivých pinů konektoru .....	43
Tab. 8 Korekční tabulka .....	56
Tab. 9 Naměřené hodnoty senzoru TGS2442 .....	59
Tab. 10 Tabulka koeficientů normálního rozdělení .....	61
Tab. 11 Naměřené hodnoty senzoru TGS5042 .....	62
Tab. 12 Naměřené hodnoty senzoru TGS4161 .....	64
Tab. 13 Naměřené hodnoty senzoru TGS2611 .....	66

## Úvod

Měřením koncentrace plynů lze předejít mnoha nebezpečím, např. zabránit explozi nebo předejít poškození lidského zdraví ze zvýšené koncentrace nebezpečných plynů. Měření koncentrace plynů se neuplatňuje pouze v průmyslu či v technologických pracovištích, ale i v běžných domácnostech.

Tato práce se zabývá návrhem elektronického měřicího systému pro měření koncentrací plynů, která bude použita jako výuková demonstrační úloha pro cvičení v předmětech EMP (Elektronické měření a přístroje) a MS (Měřicí systémy). Tato jednotka bude měřit koncentraci oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a metanu v ovzduší. Poslední měřenou veličinou je teplota ovzduší pro teplotní kompenzaci senzorů plynů. Naměřená data se budou vizualizovat na PC.

V první kapitole se proberou základy žhavených polovodičových a elektrochemických senzorů plynů a působením výše uvedených plynů na zdraví člověka.

V druhé kapitole se provede základní analýza hardwarových prvků, převážně z oblasti řídicí jednotky a použitých senzorů.

Ve třetí kapitole se provede hardwarový návrh měřicího systému se stručným popisem jednotlivých hardwarových částí.

Čtvrtá kapitola se zabývá softwarovým návrhem měřicího systému a ovládáním jednotlivých řídicích programů.

V páté kapitole je popsán postup kalibrace jednotlivých senzorů plynů a jsou zde reprezentované výsledky kalibrace ve formě kalibračních křivek.

Šestá kapitola popisuje návrh vizualizace v Matlabu.

V poslední sedmé kapitole jsou určeny základní nejistoty měření k jednotlivým senzorům a jsou vytvořeny grafy s normálním rozdělením.

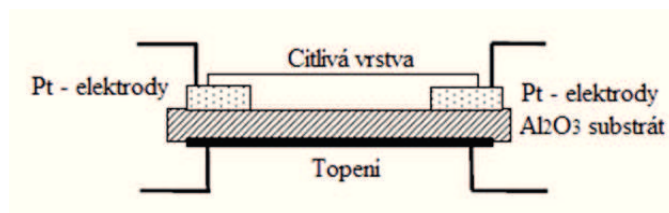
# 1 Teoretický úvod

V této kapitole jsou popsány principy funkce žhavených polovodičových a elektrochemických senzorů pro měření koncentrace plynů v ovzduší. Dále jsou zde uvedeny nebezpečné vlivy oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) a metanu (CH<sub>4</sub>) na lidský organismus.

## 1.1 Žhavené polovodičové senzory

V současné době jsou polovodičové senzory nejrozšířenější, a to jak z důvodu široké škály detekovatelných plynů, tak i vysoké životnosti. Dlouhá životnost je dána tím, že při svém provozu není spotřebováván senzitivní materiál senzoru. Nevýhodou může být, že polovodičové senzory jsou náchylné k vzájemné ovlivnitelnosti různých plynů v jednom prostředí. Tento jev lze u některých plynů potlačit uhlíkovým filtrem.

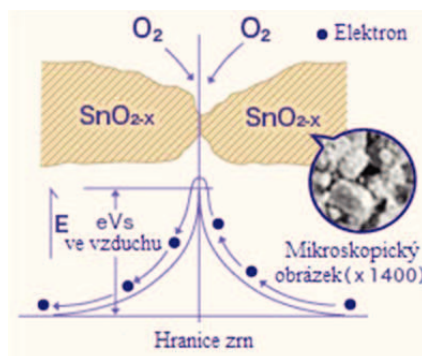
Základní částí senzoru je nosná destička z oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) nebo safíru. Zde jsou kladeny vysoké požadavky na velký izolační odpor a inertnost vůči okolním plynům. Na čelní straně se vyskytuje citlivá vrstva nejčastěji z oxidu cínitého (SnO<sub>2</sub>), mohou však být použity i jiné sloučeniny (ZnO, TiO<sub>2</sub>, In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Na stejné straně, kde je citlivá vrstva nebo na spodní straně nosné destičky je umístěné odporové topení. Citlivá vrstva a odporové topení je vyvedené přes platinové drátky k vývodům. Na obrázku 1 lze vidět základní uspořádání senzoru.



Obr. 1 Základní uspořádání senzoru [1]

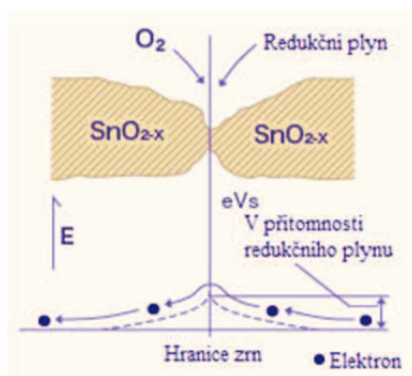
Princip funkce polovodičových senzorů spočívá ve změně vodivosti polovodičové vrstvy v přítomnosti redukčních nebo oxidačních plynů. Jedná se o povrchovou detekci. Citlivá plocha je vyhřívána, aby se urychlil průběh reakce a dopomohl k reakci aktivovaného kyslíku s molekulami redukčních nebo oxidačních plynů.

Když je senzor vystavený čistému vzduchu, kyslík (O<sub>2</sub>) je absorbován povrchem polovodiče a přitahuje k sobě volné elektrony. Vzniká tzv. potenciální bariéra, která zabraňuje průtoku elektronů a senzor má velkou rezistivitu. Tento jev lze vidět na obrázku 2.



Obr. 2 Vliv kyslíku na senzor [2]

V přítomnosti redukčních nebo oxidačních plynů, kyslík reaguje s těmito plyny a klesá úroveň absorbovaného kyslíku na povrchu polovodiče. To má za následek snížení potenciální bariéry a elektrony mohou snáze plout skrz bariéru. Rezistivita senzoru klesá. Tento jev lze vidět na obrázku 3.



Obr. 3 Vliv redukčního plynu na senzor [2]

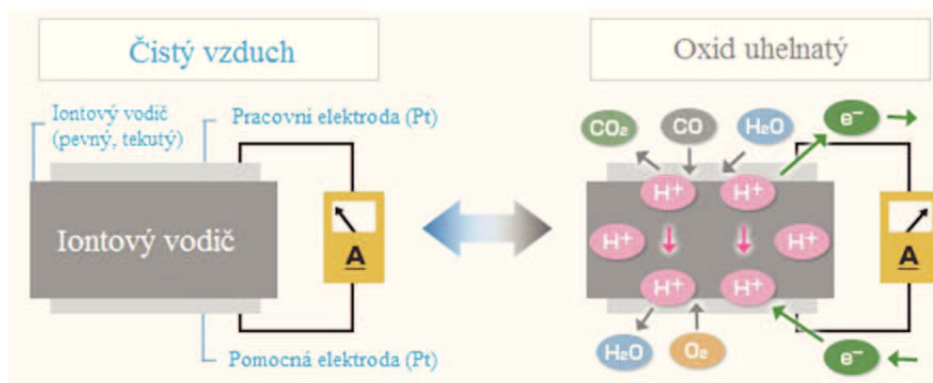
Tato změna vodivosti je vratná. Při snížení koncentrace redukčního nebo oxidačního plynu na nulu, dochází k obnovení počátečního stavu do původní hodnoty. To znamená, že se kyslík naváže zpět na povrch polovodiče.

## 1.2 Elektrochemické senzory

Elektrochemické senzory jsou založeny na mnoha principech. Mohou být například membránové, s kapalným elektrolytem, s tuhým elektrolytem nebo fungující jako palivový článek. Z důvodu velkého rozsahu tohoto tématu bude popsán jen jeden princip elektrochemického senzoru, který je použitý v této diplomové práci. Jedná se o senzor na bázi palivového článku.

V senzorech typu palivového článku jsou spotřebovávány pouze plynné komponenty z vnějšího prostředí. Palivové články jsou relativně běžně používány jako zdroje energie. Pro účely detekce plynných látek jsou konstruovány jako miniaturní buňky s velice malou spotřebou stanovených plynů. Transport plynu k indikační elektrodě je zpravidla řízen difúzí permeabilní membránou. Odpovídající elektrický proud je proto lineární funkcí koncentrace stanoveného plynu [3].

Výhodou těchto senzorů je dlouhá životnost, která je udávána kolem 1 až 3 let a schopnost přesného měření už od velmi malých koncentrací.



Obr. 4 Princip palivového článku [4]

Na obrázku 4 je zobrazen princip funkce elektrochemického (palivového článku) senzoru při vystavení oxidu uhelnatého (CO). Jakmile se CO dostane k pracovní elektrodě, nastane oxidace CO s molekulami vody ve vzduchu podle následující chemické rovnice (1.1). Veškeré chemické rovnice jsou převzaty ze zdroje [4].



Když se pracovní elektroda spojí s pomocnou elektrodou, protony ( $H^+$ ) vytvářené na pracovní elektrodě proudí k pomocné elektrodě skrz iontový vodič. Vygenerované elektrony proudí k pomocné elektrodě skrz externí vedení. Reakce kyslíku na pomocné elektrodě je zobrazena na rovnici (1.2).



### 1.3 Nebezpečné vlastnosti CO, CO<sub>2</sub> a metanu

Tyto tři plyny jsou vybrány z důvodu jejich použití v této práci. Oxid uhelnatý a oxid uhličitý jsou zdraví nebezpečné plyny. Jejich negativní vliv na lidský organismus závisí na koncentraci a délce expozice. Metan je sice pro lidský organismus netoxický, ale při určité koncentraci je výbušný.

Oxid uhelnatý je bezbarvý, hořlavý plyn bez chuti a zápachu. Vzniká nedokonalým spalováním uhlíkatých materiálů. Otrava CO způsobuje nemožnost vázat kyslík na hemoglobin (krevní barvivo), což se projevuje křečemi, kómatem a následnou smrtí. V tabulce 1 jsou uvedeny koncentrace CO a jejich zdravotní následky na základě délky expozice.

Tab. 1 Vliv CO na zdraví člověka [5]

CO (ppm)	CO (obj. %)	Příznaky
100	0,01	Žádné příznaky – bez nebezpečí
200	0,02	Mírné bolesti hlavy
400	0,04	Silné bolesti hlavy po 1-2 hodinách
800	0,08	Silné bolesti hlavy po 45 minutách; nevolnost, mdloby a bezvědomí po 2 hodinách
1000	0,1	Nebezpečná koncentrace – bezvědomí po 1 hodině
1600	0,16	Nevolnost, silné bolesti hlavy a závratě po 20 minutách
3200	0,32	Nevolnost, silné bolesti hlavy a závratě po 5-10 minutách; bezvědomí po 30 minutách
6400	0,64	Silné bolesti hlavy a závratě po 1-2 minutách; bezvědomí po 10-15 minutách
12800	1,28	Okamžité bezvědomí, nebezpečí smrti po 1-2 minutách

Oxid uhličitý je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Je hlavní odpadní látkou člověka, kterou vydechuje. CO<sub>2</sub> vzniká také hořením CO, spalováním uhlíku nebo organických látek (metan). Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší způsobuje těžší odbourávání CO<sub>2</sub> z krevního řečiště. Zvýšená koncentrace CO<sub>2</sub> způsobuje bolesti hlavy a únavu, ale také může při velkých koncentracích způsobit i smrt. V tabulce 2 jsou uvedeny koncentrace CO<sub>2</sub> a jejich vliv na zdraví člověka.

Tab. 2 Vliv CO<sub>2</sub> na zdraví člověka [6]

CO <sub>2</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (obj. %)	Příznaky
370-450	0,037-0,045	Vnější běžné prostředí – bez projevů
450-1000	0,045-0,1	Přijatelná úroveň – bez projevů
1000-2000	0,1-0,2	Pocit horšího vzduchu
2000-5000	0,2-0,5	Bolesti hlavy, nižší schopnost koncentrace, snížená pozornost
>5000	>0,5	Pocit těžkého vzduchu a nevolnost, zvýšený tep
>15000	>1,5	Potíže s dýcháním
>30000	>3	Bolesti hlavy, závratě a nevolnost
>60k-80k	>6-8	Letargie a ztráta vědomí

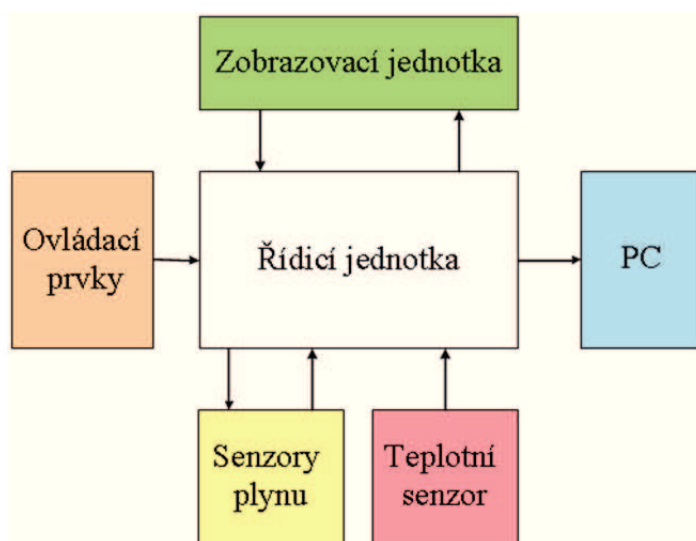
Metan (CH<sub>4</sub>) je bezbarvý plyn bez zápachu a chuti. Hlavním zdrojem je zemní plyn. Metan je extrémně hořlavý. Jeho dolní mez výbušnosti (DMV) je 4,4 % a horní mez výbušnosti (HMV) je 15 %. To znamená, že od DMV je směs plynů hořlavá a od HMV je směs plynů nehořlavá.

## 2 Analýza HW prvků měřicího systému

V této kapitole se budeme zabývat analýzou HW prvků měřicího systému, které se použijí v samotném řešení.

Cílem této práce je sestavit aplikaci pro měření koncentrace plynů v ovzduší. Naměřené hodnoty budou teplotně kompenzovány a vizualizovány na PC. Vizualizace je popsána v kapitole 6. Sestavený návrh bude používán jako výuková demonstrační úloha.

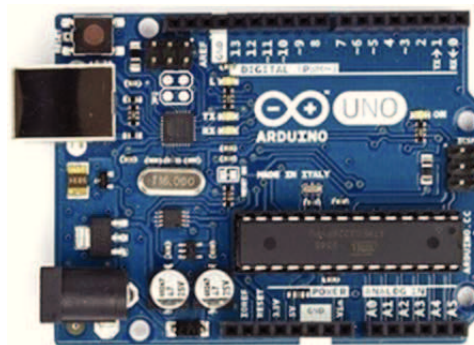
Na obrázku 5 je hardwarové blokové schéma aplikace. Hlavním prvkem návrhu je řídicí jednotka, která řídí veškerou činnost aplikace. Na řídicí jednotku se napojují zbylé subsystemy: zobrazovací jednotka, ovládací prvky, senzory plynů, teplotní senzor a PC. Jednotlivé bloky jsou popsány v následujících kapitolách.



Obr. 5 Blokové schéma návrhu ideové HW části

### 2.1 Řídicí jednotka

Jak již bylo popsáno výše, řídicí jednotka obstarává veškerou výpočetní činnost. Proto byl kladen důraz na dostatečný počet digitálních vstupů/výstupů, analogových vstupů, snadnému propojení s PC a dostatečný výkon. Na základě těchto specifikací byla zvolena platforma Arduino, která je založena na mikrokontrolerech od firmy Atmel a je open-source. Tato platforma umožňuje rychlý vývoj a snadné používání.



Obr. 6 Arduino Uno [7]



Byla vybrána platforma Arduino Uno (Obr. 6), která je nejrozšířenější a splňuje všechny požadavky. Tato platforma je založená na 8 bitovém mikrokontroléru ATmega328P. Arduino Uno snadno umožňuje propojení s PC přes USB kabel. Jako převodník USB/sériová linka je použita naprogramovaná ATmega16U2. V tabulce 3 jsou uvedeny technické specifikace platformy.

Tab. 3 Technické specifikace platformy Arduino Uno [7]

Parametr	Hodnota
Pracovní napětí	5 V
Vstupní napětí (doporučené)	7-12 V
Výstupní napětí (limitní)	6-20 V
Digitální I/O	14 (z toho 6 PWM)
PWM digitální I/O	6
Analogové vstupy	6
Max. odběr z každého I/O	20 mA
Max. odběr z 3V3 výstupu	50 mA
Flash paměť	32 KB (0,5 KB zabírá bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Taktovací frekvence	16 MHz
Délka	68,6 mm
Šířka	53,4 mm
Váha	25 g

Použité senzory v této práci budou analogové, a proto se musí jejich analogový signál převést na digitální signál A/D převodníkem. Arduino Uno disponuje šesti A/D převodníky. Jejich základní parametry jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 Základní parametry A/D převodníku [8]

Parametr	Hodnota
Rozlišení	10 bit
Absolutní přesnost	$\pm 2$ LSB
Integrální nelinearita	0,5 LSB
Rychlost převodu	13-260 $\mu$ s
Počet kanálů	6
Vstupní rozsah	0-Vcc

Podle následujícího vzorce (2.1) převzatého z technické dokumentace [8] se vypočítá výstupní digitální hodnota z A/D převodníku.

$$ADC = \frac{V_{in} \cdot 2^n}{V_{ref}} \quad (2.1)$$

Kde je:

- ADC – digitální hodnota A/D převodníku
- V<sub>in</sub> – vstupní napětí (V)
- V<sub>ref</sub> – referenční napětí (V)
- n – rozlišení A/D převodníku

K vypočítání citlivosti A/D převodníku se použije vzorec (2.2), který je převzatý ze zdroje [8].

$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^n} \text{ (mV/bit)} \quad (2.2)$$

Kde je:

- LSB – nejméně významný bit
- V<sub>ref</sub> – referenční napětí (V)
- n – rozlišení A/D převodníku

Například při použití 10-bit A/D převodníku s referenčním napětím 5 V a vstupním napětím 2,5 V, vypočítáme digitální hodnotu a citlivost A/D převodníku.

$$ADC = \frac{V_{in} \cdot 2^n}{V_{ref}} = \frac{2,5 \cdot 2^{10}}{5} = 512$$

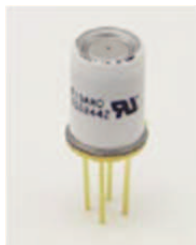
$$LSB = \frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{5}{2^{10}} = 4,88 \text{ mV/bit}$$

## 2.2 Senzory

V aplikaci budou dva typy senzorů. První typ bude měřit koncentraci plynů v ovzduší. Jedná se o plyny: CO, CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub>. Druhý typ senzorů bude měřit teplotu okolí, aby se mohla provést kompenzace teploty působící na senzory plynů.

### 2.2.1 Měření CO

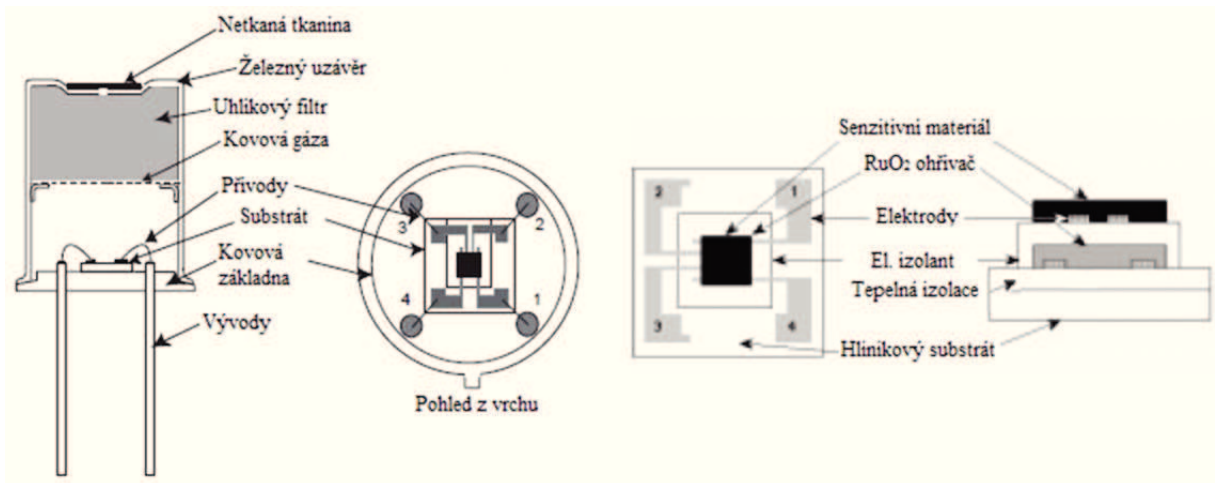
Pro měření oxidu uhelnatého je vybrán senzor TGS2442. Výhodou tohoto senzoru je vysoká senzitivita na CO, nízká spotřeba, dlouhá životnost a nízká cena. Senzor je ukázaný na obrázku 7.



Obr. 7 Senzor TGS2442 [9]

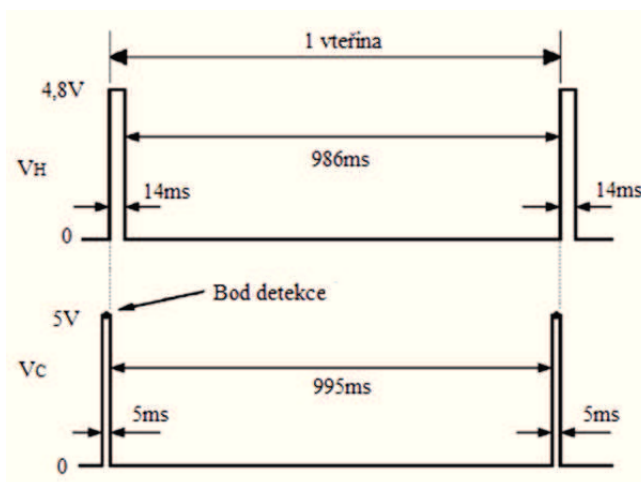
Jedná se o vícevrstvou strukturu, která je znázorněná na obrázku 8. Mezi ohřivačem z oxidu rutheničitého (RuO<sub>2</sub>) a hliníkovým substrátem je tepelná izolace ze skla. Na tepelné izolaci je

připevněná dvojice zlatých elektrod přivedených k ohřívači. Na elektrickém izolátoru je vytvořena na plyn reagující vrstva z oxidu cínitého ( $\text{SnO}_2$ ), která překrývá ohřívač. Na elektrickém izolátoru je připevněná dvojice zlatých elektrod pro měření odporu aktivní vrstvy  $\text{SnO}_2$ . Na horní straně senzoru je umístěný filtr z aktivního uhlíku, který snižuje vliv ostatních plynů.

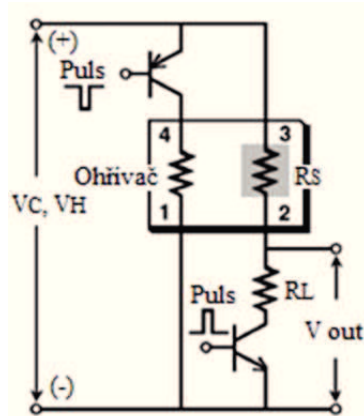


Obr. 8 Struktura senzoru TGS2442 [9]

Měření s TGS2442 probíhá v 1s cyklech tak, jak je uvedeno na obrázku 9. Při zahřívacím cyklu se senzor 14 ms zahřívá a poté se na 986 ms vypne napájení ohřívače. U měřicího cyklu se odpojí na 995 ms napájení aktivní části senzoru a v následujících 5ms se odečte napětí na zatěžovacím senzoru  $R_L$ . Doporučené zapojení výrobce je na obrázku 10.



Obr. 9 Měřicí cyklus TGS2442 [9]



Obr. 10 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS2442 [9]

Výrobce udává měřitelný rozsah od 30 ppm do 1000 ppm CO. Podle následujícího vzorce převzatého z [9] se vypočítá koncentrace CO v ovzduší.

Podle vzorce (2.3) se vypočítá odpor snímací vrstvy senzoru:

$$R_S = \frac{V_{nap} \cdot R_L}{V_{out}} - R_L \quad (\Omega) \quad (2.3)$$

Kde je:

- $R_L$  – odpor zatěžovacího rezistoru ( $\Omega$ )
- $R_S$  – odpor snímací vrstvy ( $\Omega$ )
- $V_{nap}$  – napájecí napětí (V)
- $V_{out}$  – změřené napětí na rezistoru  $R_L$  (V)

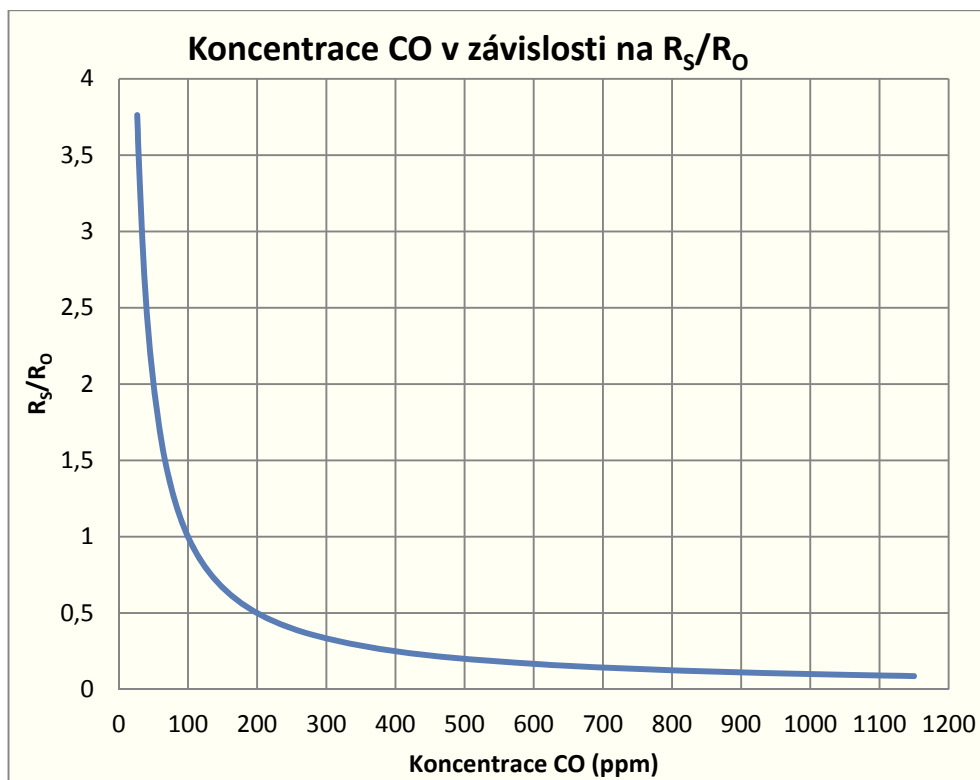
Koncentrace CO v ovzduší se vypočítá podle vzorce (2.4):

$$C_{CO} = \frac{100}{\frac{R_S}{R_0}} \quad (ppm) \quad (2.4)$$

Kde je:

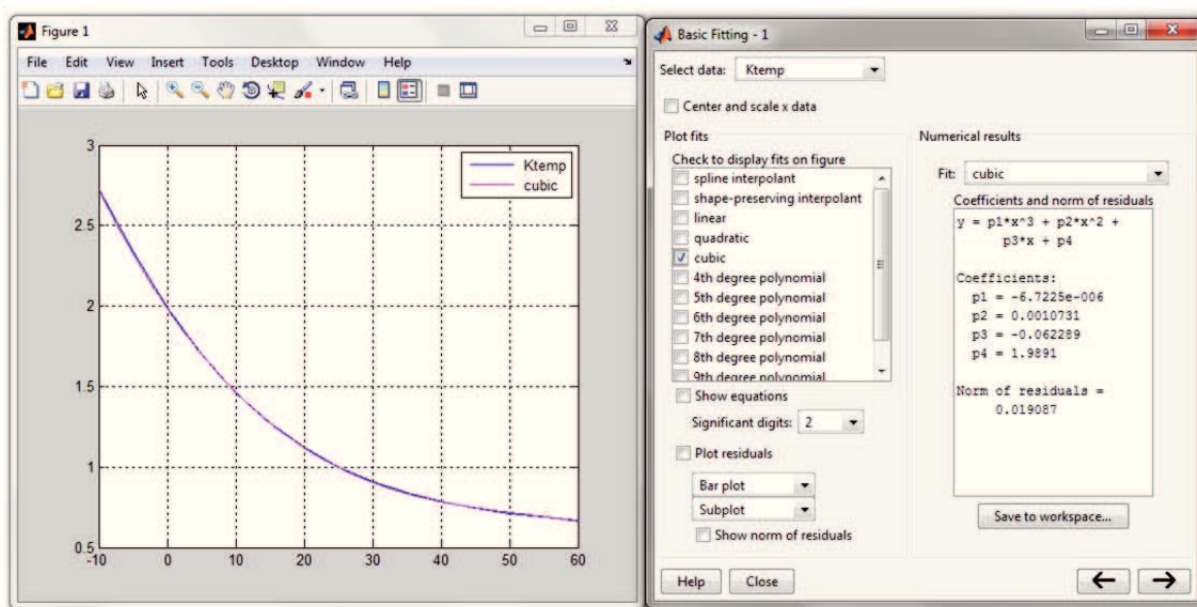
- $C_{CO}$  – koncentrace CO (ppm)
- $R_S$  – odpor snímací vrstvy ( $\Omega$ )
- $R_0$  – odpor snímací vrstvy při 100 ppm CO ( $\Omega$ )
- $V_{nap}$  – napájecí napětí (V)
- $V_{out}$  – změřené napětí na rezistoru  $R_L$  (V)

Na následujícím obrázku je graf koncentrace CO pro různé poměry  $R_S/R_0$  o teplotě okolí 25 °C a relativní vlhkosti 50 %.



Obr. 11 Graf koncentrace CO v ovzduší pro různé poměry  $R_s/R_0$

Tento výsledek koncentrace není korektní, protože je zanedbaný vliv teploty okolí. Pomocí koeficientů v technické dokumentaci převzatých z [9], je sestavená křivka v programu Matlab. Tato křivka je proložena kubickou křivkou a jsou dopočítány koeficienty polynomu. Křivku v prostředí Matlab lze vidět na obrázku 12.



Obr. 12 Výpočet koeficientů polynomu senzoru TGS2442

Koeficienty polynomu jsou:

$$p_1 = -6,7225 \cdot 10^{-6}$$

$$p_2 = 0,001073$$

$$p_3 = -0,062289$$

$$p_4 = 1,9891$$

Výpočet teplotního koeficientu  $K_{temp}$ :

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4 \quad (2.5)$$

Kde je:

$K_{temp}$  – teplotní koeficient

$p_1$ - $p_4$  – koeficienty polynomu

$x$  – aktuální teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )

Například při teplotě  $25^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti 50 % naměříme napětí na  $R_L = 2,5 \text{ V}$ . Napájecí napětí  $V_{nap} = 5 \text{ V}$ . Odpor zatěžovacího rezistoru  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$ .  $R_O = 10 \text{ k}\Omega$  při 100 ppm CO. V následujících krocích je teoretický výpočet koncentrace CO.

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4$$

$$K_{temp} = -6,7225 \cdot 10^{-6} \cdot 25^3 + 0,001073 \cdot 25^2 - 0,062289 \cdot 25 + 1,9891 = 0,9975$$

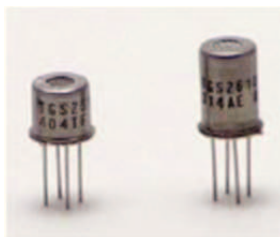
$$R_S = \frac{V_{nap} \cdot R_L}{V_{out}} - R_L = \frac{5 \cdot 10000}{2,5} - 10000 = 10000 \Omega$$

$$C_{CO} = \frac{100}{\left(\frac{R_S}{K_{temp}}\right)} = \frac{100}{\left(\frac{10000}{0,9975}\right)} = 99,75 \text{ ppm}$$

Výslednou koncentraci můžeme zkontrolovat podle obrázku 11. Výsledek by měl být 100 ppm, ale z důvodu zanedbání chyby při interpolaci je výsledek 99,75 ppm.

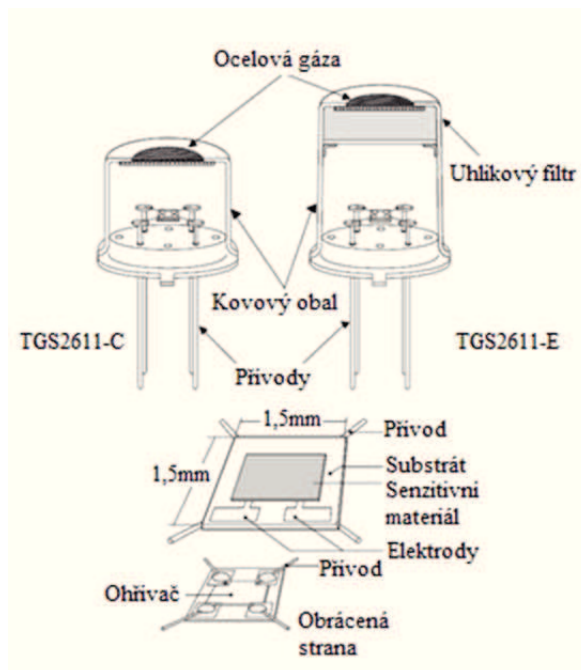
### 2.2.2 Měření $\text{CH}_4$

Pro měření metanu byl vybrán senzor TGS2611. Konstrukcí je podobný jako senzor TGS2442 v kapitole 2.2.1. Na obrázku 13 jsou zobrazeny dva konstrukční typy senzoru TGS2611.



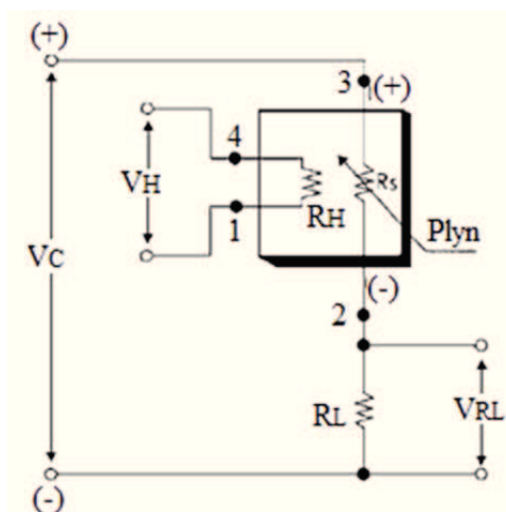
Obr. 13 Dva konstrukční typy senzoru TGS2611 [10]

Struktury senzorů jsou na obrázku 14. Rozdíl v konstrukci je takový, že TGS2611-C nemá uhlíkový filtr a může být ovlivňován iso-butanem nebo ethanolem. Typ TGS2611-E má uhlíkový filtr a výše uvedenými plyny není ovlivňován.



Obr. 14 Struktura senzoru TGS2611 [10]

Měření probíhá podobně jako u TGS2442, ale neměří se v cyklech. Žhavení je sepnuté stále a napětí na zatěžovacím odporu  $R_L$  se odečítá po době ustálení senzoru. Doporučené zapojení od výrobce je na obrázku 15.



Obr. 15 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS2611 [10]

Výrobce udává měřitelný rozsah od 500 ppm do 10000 ppm  $\text{CH}_4$ . Podle následujícího vzorce (2.6) převzatého z [11] se vypočítá koncentrace  $\text{CH}_4$  v ovzduší.

$$C_{CH_4} = \left(46,2 \cdot \frac{R_S}{R_O}\right)^{\frac{1}{0,45}} \text{ (ppm)} \quad (2.6)$$

Kde je:

$C_{CH_4}$  – koncentrace  $CH_4$  (ppm)

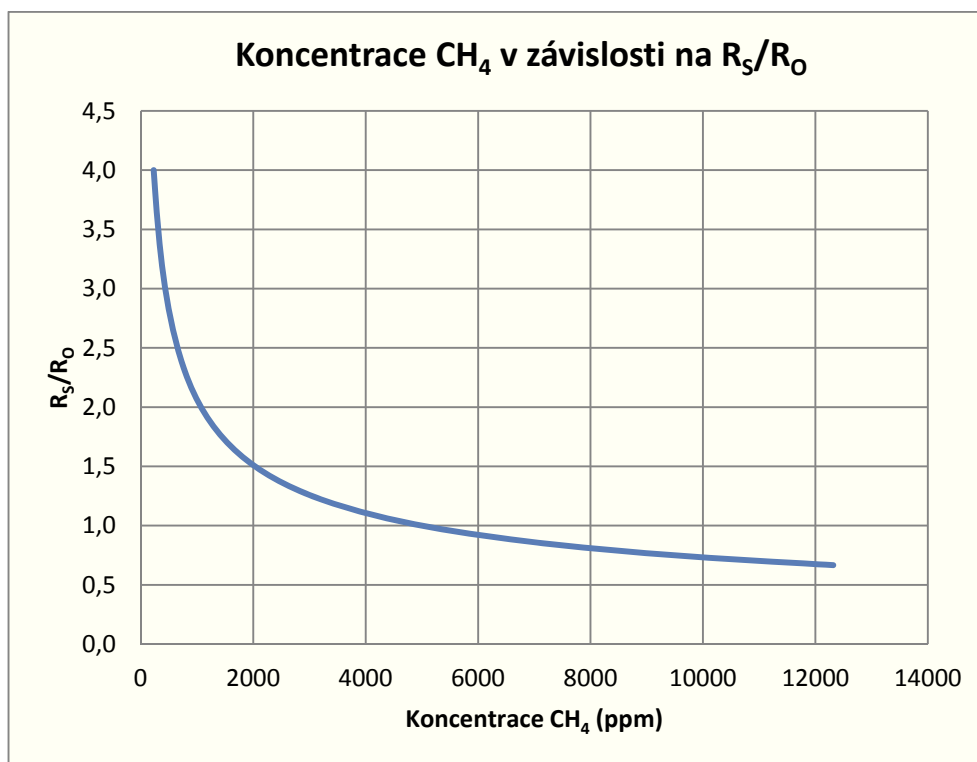
$R_S$  – odpor snímací vrstvy (stejný výpočet jako u vzorce (2.3)) ( $\Omega$ )

$R_O$  – odpor snímací vrstvy při 5000 ppm  $CH_4$  ( $\Omega$ )

$V_{RL}$  – změřené napětí na rezistoru  $R_L$  (V)

$V_{nap}$  – napájecí napětí (V)

Na následujícím obrázku je graf koncentrace  $CH_4$  pro různé poměry  $R_S/R_O$  o teplotě okolí 20 °C a relativní vlhkosti 65 %.



Obr. 16 Graf koncentrace  $CH_4$  v ovzduší pro různé poměry  $R_S/R_O$

Následně se dopočítají koeficienty polynomu teplotní kompenzace, které jsou:

$$p_1 = -2,5 \cdot 10^{-6}$$

$$p_2 = 0,0004142$$

$$p_3 = -0,029821$$

$$p_4 = 1,4499$$



Výpočet teplotního koeficientu  $K_{temp}$ :

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4 \quad (2.7)$$

Kde je:

- $K_{temp}$  – teplotní koeficient
- $p_1$ - $p_4$  – koeficienty polynomu
- $x$  – aktuální teplota ( $^{\circ}\text{C}$ )

Například při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkosti 65 % naměříme napětí na  $R_L = 2,5\text{ V}$ . Napájecí napětí  $V_{nap} = 5\text{ V}$ . Odpor zatěžovacího rezistoru  $R_L = 2,5\text{ k}\Omega$ .  $R_O = 2,5\text{ k}\Omega$  při 5000 ppm  $\text{CH}_4$ . V následujících krocích je teoretický výpočet koncentrace  $\text{CH}_4$ .

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4$$

$$K_{temp} = -2,5 \cdot 10^{-6} \cdot 25^3 + 0,0004142 \cdot 25^2 - 0,029821 \cdot 25 + 1,4499 = 0,999$$

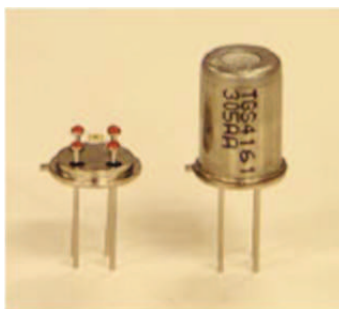
$$R_S = \frac{V_{nap} \cdot R_L}{V_{out}} - R_L = \frac{5 \cdot 2500}{2,5} - 2500 = 2500\ \Omega$$

$$C_{\text{CH}_4} = \left( 46,2 \cdot \frac{R_S}{R_O} \cdot K_{temp} \right)^{\frac{1}{0,45}} = \left( 46,2 \cdot \frac{2500}{2500} \cdot 0,999 \right)^{\frac{1}{0,45}} = 5014\ \text{ppm}$$

Výsledek by měl být 5000 ppm, ale z důvodu zanedbání chyby při interpolaci je výsledek 5014 ppm.

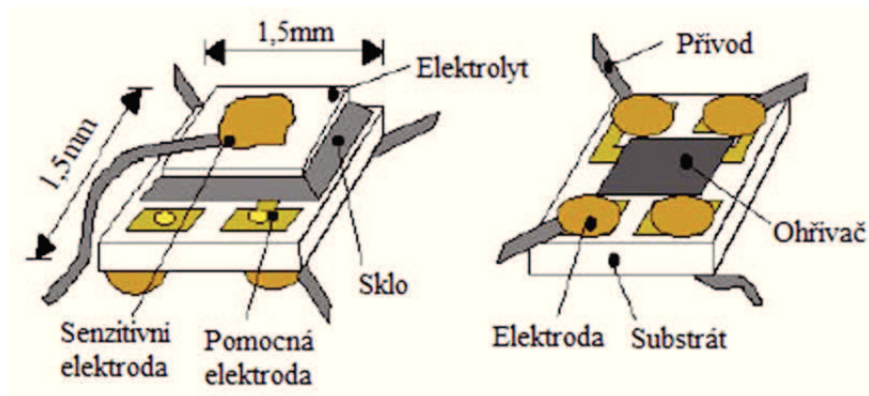
### 2.2.3 Měření $\text{CO}_2$

Pro měření koncentrace  $\text{CO}_2$  v ovzduší byl vybrán senzor TGS4161 (Obr. 17). TGS4161 se vyznačuje vysokou citlivostí na plyn  $\text{CO}_2$ , dlouhou životností a nízkou cenou. Další výhodou je vysoká teplotní stabilita a proto se nemusí TGS4161 teplotně kompenzovat.



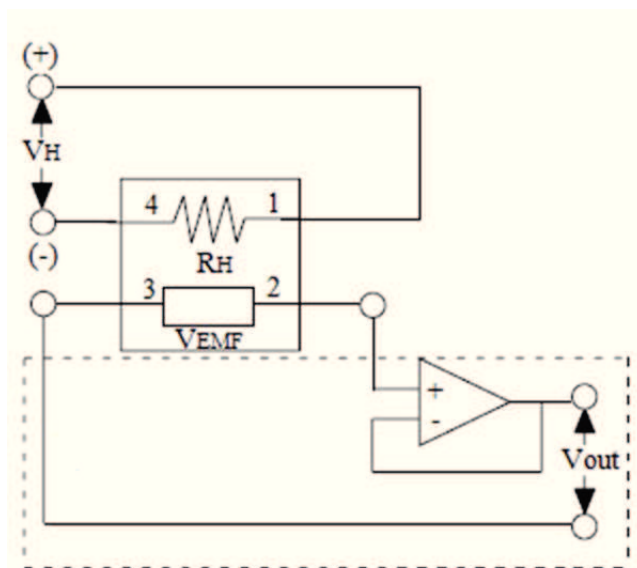
Obr. 17 Senzor TGS4161 [12]

Senzitivní tuhý elektrolyt je vložený mezi dvěma elektrodami. Ze spodní strany je ohříváč z oxidu rutheničitého ( $\text{RuO}_2$ ). Senzitivní elektroda (katoda) je sloučenina uhličitanu lithného ( $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ) a zlata. Pomocná elektroda (anoda) je ze zlata. Mezi těmito elektrodami se měří elektromotorické napětí. Na obrázku 18 je zobrazena struktura snímacího prvku.



Obr. 18 Struktura snímacího prvku senzoru TGS4161 [12]

Na obrázku 19 je výrobcem doporučené zapojení měřicího obvodu. Na ohřivač je stále přivedené napětí a mezi elektrodami 2 a 3 vzniká elektromotorické napětí závislé na koncentraci CO<sub>2</sub>. Elektromotorické napětí se měří přes vysokoimpedanční zesilovač.



Obr. 19 Základní schéma zapojení měřicího obvodu a s TGS4161 [12]

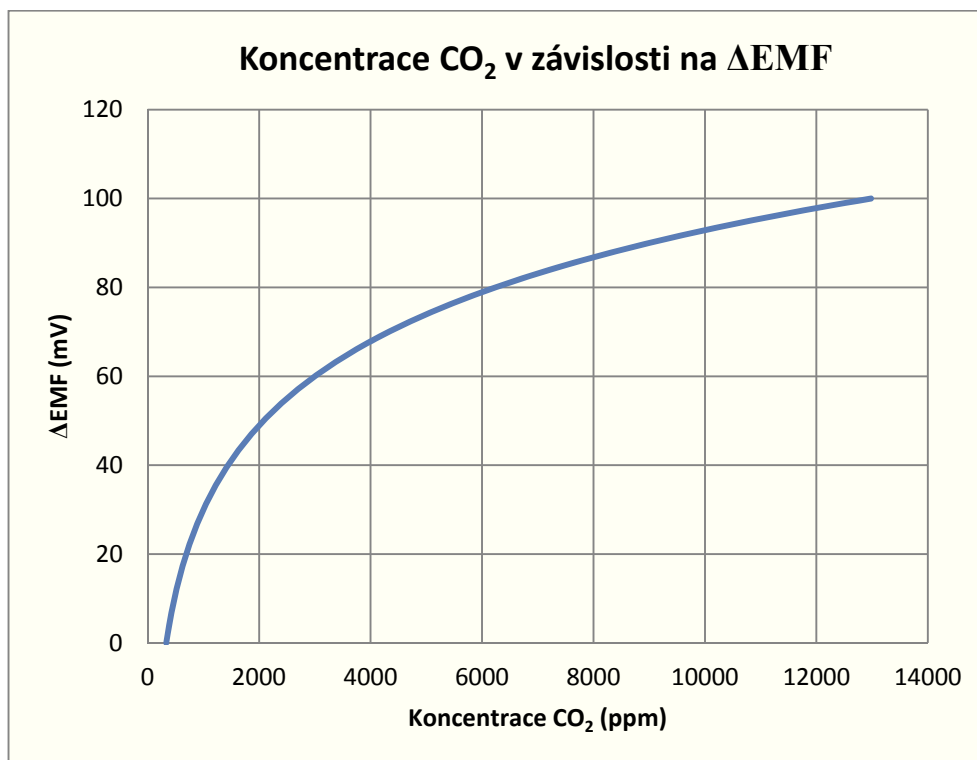
Výrobce udává měřitelný rozsah od 350 ppm do 10000 ppm. Podle vzorce (2.8) převzatého ze zdroje [13] se vypočítá koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší.

$$C_{CO_2} = 10^{\left(\frac{(EMF1 - EMF2) + 158,631}{62,877}\right)} \text{ (ppm)} \quad (2.8)$$

Kde je:

- C<sub>CO<sub>2</sub></sub> – koncentrace CO<sub>2</sub> (ppm)
- EMF1 – EMF při 350 ppm CO<sub>2</sub> (mV)
- EMF2 – naměřené EMF (mV)

Na obrázku 20 je graf závislosti koncentrace CO<sub>2</sub> na senzitivitě ΔEMF o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 %.



Obr. 20 Graf koncentrace CO<sub>2</sub> pro různá elektromotorická napětí

Například při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 65 % naměříme elektromotorické napětí EMF2 = 240 mV. Elektromotorické napětí EMF1 = 300 mV při koncentraci CO<sub>2</sub> = 350 ppm. V následujících krocích je teoretický výpočet koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší.

$$C_{CO_2} = 10^{\left(\frac{\Delta EMF + 158,631}{62,877}\right)}$$

$$\Delta EMF = EMF1 - EMF2 = 300 - 240 = 60 \text{ mV}$$

$$C_{CO_2} = 10^{\left(\frac{60 + 158,631}{62,877}\right)} = 3000 \text{ ppm}$$

Výsledek lze zkontrolovat podle obrázku 20.

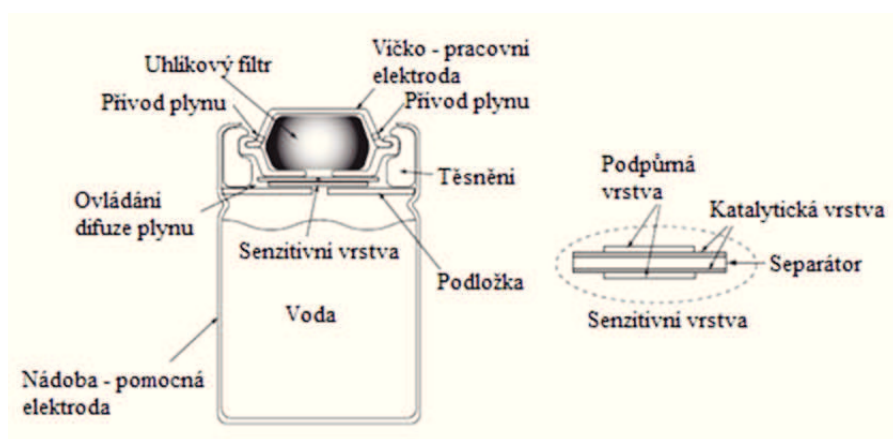
#### 2.2.4 Měření CO elektrochemickým senzorem

Pro měření oxidu uhelnatého je vybrán elektrochemický senzor TGS5042. Do této aplikace je přidán z důvodu, aby bylo možné porovnat vlastnosti a naměřená data se senzorem TGS2442. Výhodou tohoto senzoru je dlouhá životnost, lineární výstup a princip operace, kdy pracuje jako zdroj proudu. Senzor je ukázaný na obrázku 21.



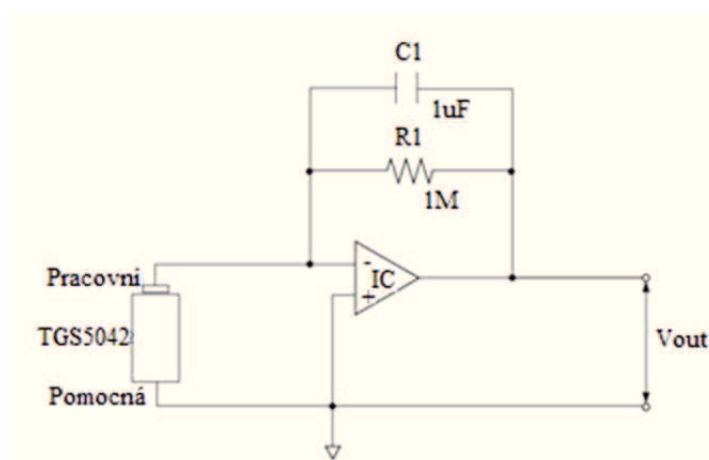
Obr. 21 Senzor TGS5042 [14]

Na obrázku 22 je zobrazena struktura senzoru. Senzitivní vrstva je vložena mezi ocelovou podložku, která tvoří pomocnou elektrodu a ocelové víčko s uhlíkovým filtrem, které tvoří pracovní elektrodu. Tato struktura je vložena do ocelové nádoby. Voda je uložena ve spodní části.



Obr. 22 Struktura senzoru TGS5042 [14]

TGS5042 se chová jako proudový zdroj. Výrobce udává na každém senzoru jeho citlivost. V tomto případě je citlivost 1,585 nA/ppm. Doporučený měřicí obvod je na obrázku 23. Jedná se o převodník proudu na napětí s velkým zesílením.



Obr. 23 Doporučené zapojení měřicího obvodu s TGS5042 [14]

Výrobce udává měřitelný rozsah od 0 ppm do 10000 ppm CO. Podle následujícího vzorce se vypočítá koncentrace CO v ovzduší.

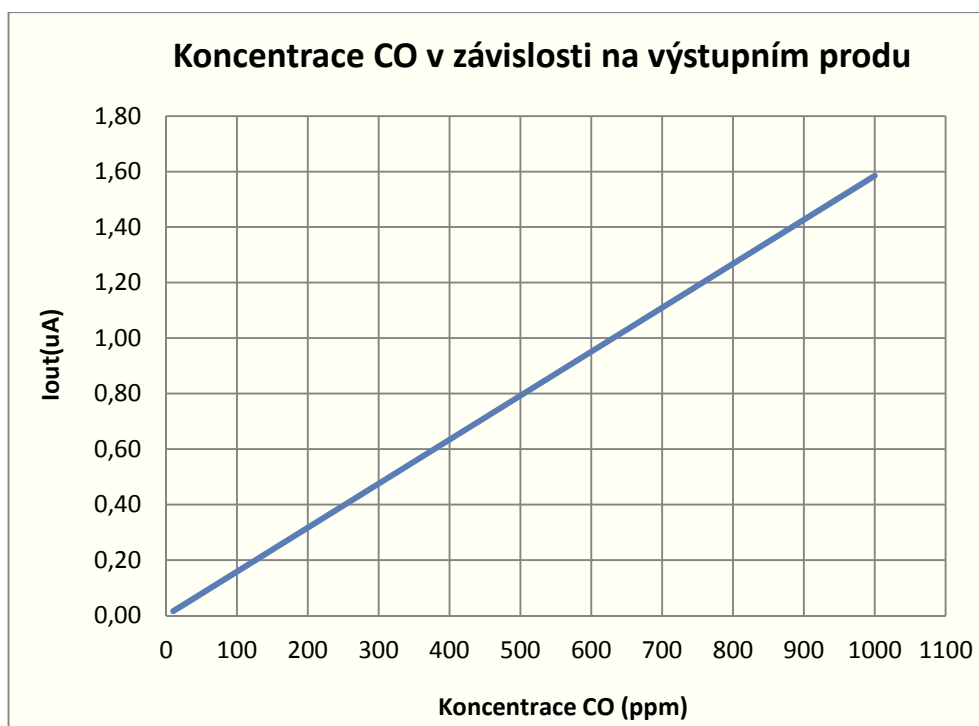
Podle vzorce (2.9) se vypočítá koncentrace CO v ovzduší:

$$C_{COel} = \frac{U}{\frac{Gain}{Sens}} \text{ (ppm)} \quad (2.9)$$

Kde je:

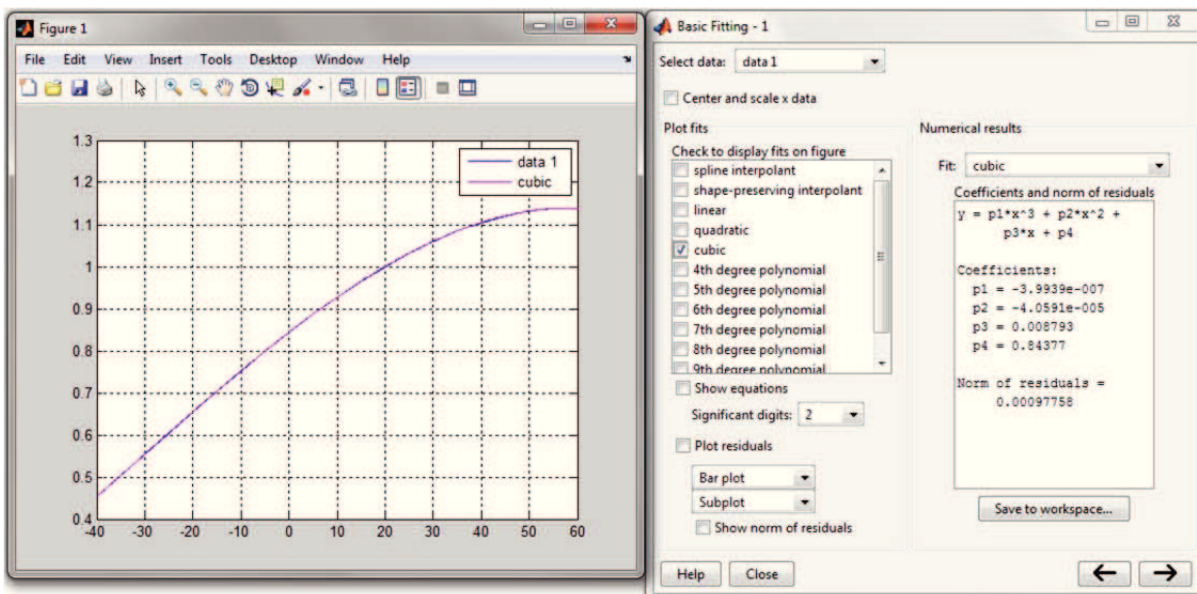
- $C_{COel}$  – koncentrace CO (ppm)
- $U$  – změřené napětí na výstupu OZ (V)
- Gain – zesílení OZ
- Sens – senzitivita (nA/ppm)

Na následujícím obrázku je graf koncentrace CO o teplotě okolí 20 °C a relativní vlhkosti 50 %.



Obr. 24 Graf koncentrace CO v ovzduší pro výstupní proud ze senzoru

Senzor je teplotně závislý a proto je nutné výslednou koncentraci upravit pro aktuální teplotu ovzduší. Z technické dokumentace ze zdroje [14] jsou převzaty teplotní parametry, ze kterých je sestavena křivka v programu Matlab. Křivka se proloží kubickou křivkou a dopočítají se parametry polynomu, jak můžeme vidět na níže uvedeném obrázku. Oproti polovodičovým sensorům má opačnou teplotní závislost.



Obr. 25 Výpočet koeficientů polynomu senzoru TGS5042

Koeficienty polynomu jsou:

$$p_1 = -3,9939 \cdot 10^{-7}$$

$$p_2 = -4,0591 \cdot 10^{-5}$$

$$p_3 = 0,008793$$

$$p_4 = 0,84377$$

Výpočet teplotního koeficientu  $K_{temp}$ :

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4 \quad (2.10)$$

Kde je:

$K_{temp}$  – teplotní koeficient

$p_1$ - $p_4$  – koeficienty polynomu

$x$  – aktuální teplota (°C)

Například při teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 % naměříme napětí výstupu zesilovače  $U = 1$  V při zesílení  $Gain = 3300000$ . Senzitivita senzoru je  $Sens = 1,585$  nA/ppm. V následujících krocích je teoretický výpočet koncentrace CO.

$$K_{temp} = p_1 \cdot x^3 + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x + p_4$$

$$K_{temp} = -3,9939 \cdot 10^{-7} \cdot 20^3 - 4,0591 \cdot 10^{-5} \cdot 20^2 + 0,008793 \cdot 20 + 0,84377 = 1,0002$$

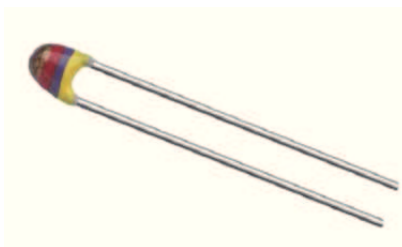
$$Sens_{temp} = \frac{Sens}{K_{temp}} = \frac{1,585 \cdot 10^{-9}}{1,0002} = 1,5847 \cdot 10^{-9} \text{ nA}$$

$$C_{COel} = \frac{U}{Sens} = \frac{1}{1,5847 \cdot 10^{-9}} = 191 \text{ ppm}$$

## 2.2.5 Měření teploty

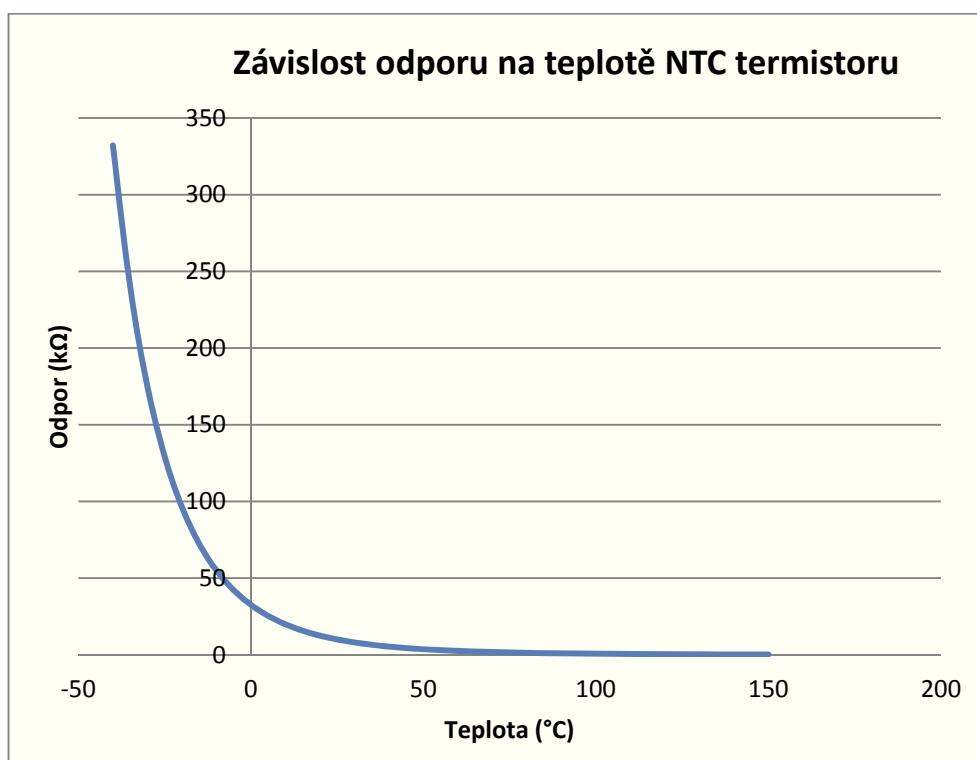
Žhavené polovodičové senzory a elektrochemické senzory jsou silně závislé na okolní teplotě, proto je nutné kompenzovat vliv teploty. Pro měření teploty byl vybrán polovodičový senzor termistor.

Termistor je elektronická součástka, jejíž elektrický odpor je silně závislý na teplotě. Ve srovnání s kovovými snímači teploty (Pt, Ni, Cu) je teplotní koeficient odporu několikanásobně vyšší a závislost elektrického odporu na teplotě výrazně nelineární. Z hlediska průběhu závislosti elektrického odporu na teplotě jsou termistory děleny na termistory PTC a NTC. [15]



Obr. 26 Termistor [16]

V této práci je použitý NTC termistor, který je zobrazený na obrázku 26. Jeho odpor s rostoucí teplotou klesá (Obr. 27). Při teplotě 25 °C má odpor 10 kΩ, a proto můžeme zanedbat vliv odporu kontaktů. Maximální měřitelný rozsah je -40 až 150 °C.



Obr. 27 Závislost odporu na teplotě NTC termistoru

Jednou z možností jak přepočítat odpor termistoru na teplotu, je za použití Steinhart-Hartovy rovnice. Z důvodu velkého rozsahu výpočtů jsou zde uvedeny pouze výsledné hodnoty. Kompletní výpočet je uvedený v příloze A. Výsledné koeficienty jsou uvedeny níže.

$$\begin{aligned}A &= 0,0011395 \\B &= 0,00023223 \\C &= 9,68058 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

Výsledný výpočet teploty je podle rovnice (2.11) převzaté ze zdroje [17]:

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3} \text{ (K)} \quad (2.11)$$

Kde je:

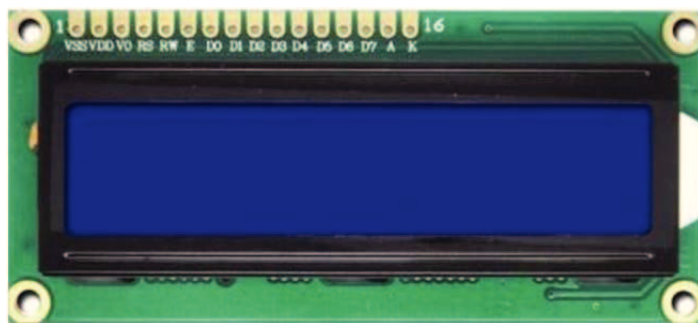
- T – teplota (K)
- R – odpor termistoru ( $\Omega$ )

### 2.3 Zobrazovací jednotka

Aby si uživatel měřicího systému mohl prohlížet aktuální informace o koncentraci plynů v ovzduší a teplotě okolí bez použití vizualizace na PC, je použita zobrazovací jednotka.

Vizualizovat data lze mnoha způsoby. Například za použití panelu složeného ze 7 segmentových LED displejů. Nevýhodou je jejich velikost, cena při vizualizaci delších textů a možnost zobrazení jen omezeného množství znaků.

Další možnosti zobrazení informace je za použití LCD displejů, které se nejčastěji zhotovují s vlastním řadičem. Řadič zprostředkovává komunikaci mezi LCD displejem a externí řídicí jednotkou. Výhodou je pak snadné ovládání displeje a razantní snížení počtu datových linek. Z těchto důvodů byl vybrán LCD displej MC21605C6WK-SPTLY (Obr. 28) s řadičem, jako zobrazovací jednotka. Jedná se o 16 znakový, 2 řádkový displej.

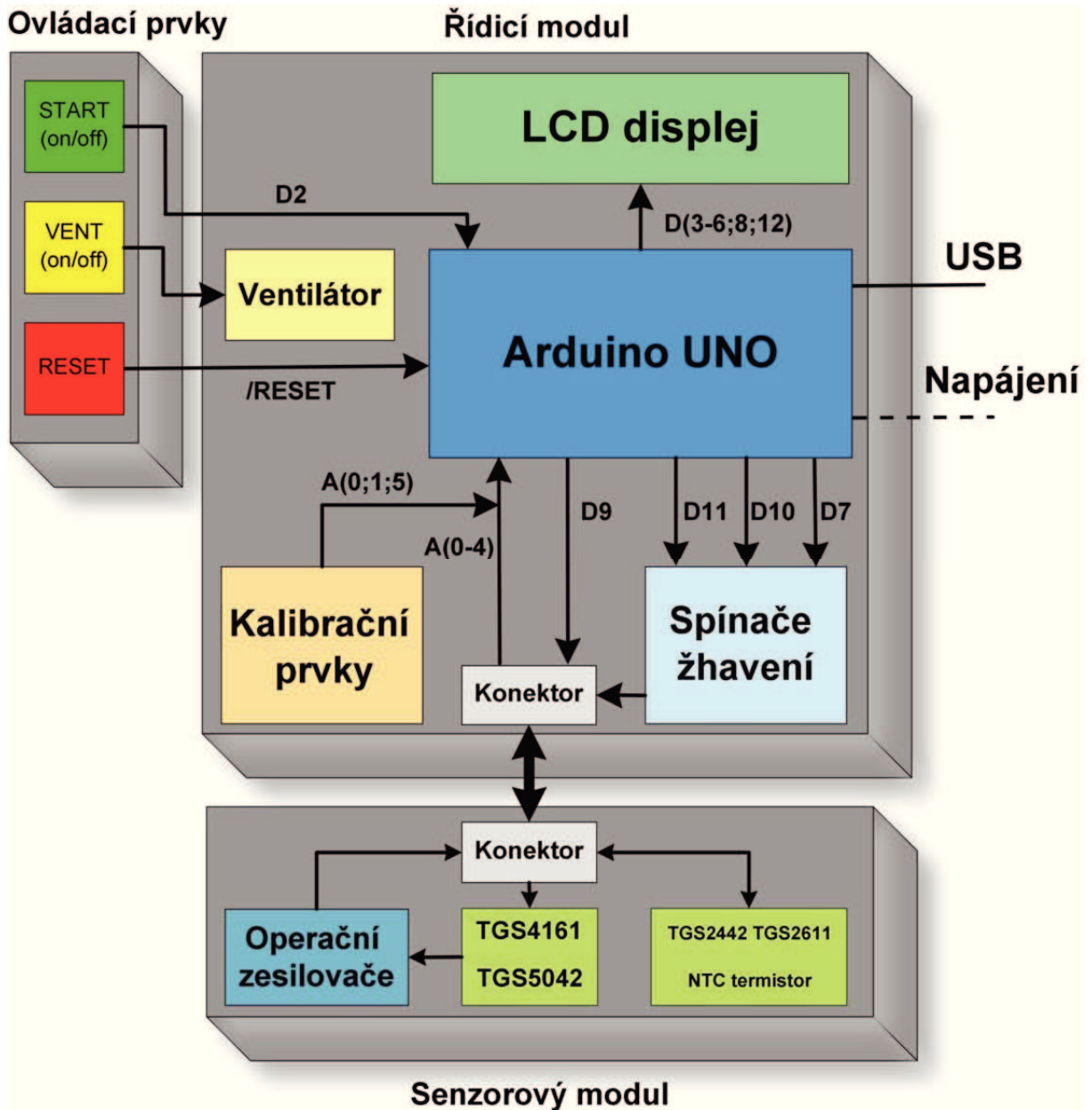


Obr. 28 LCD displej MC21605C6WK-SPTLY [18]



### 3 HW návrh měřicího systému

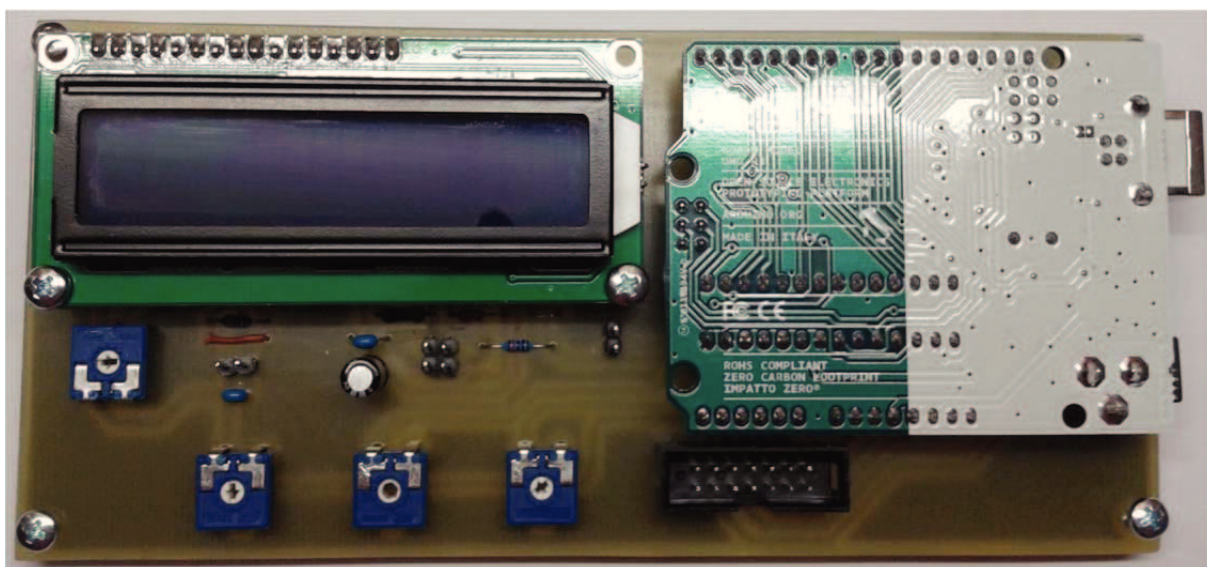
Měřicí systém je rozdělený na dvě části. Na řídicí část a sensorovou část. Blokové schéma lze vidět na obrázku 29. V následující kapitole jsou tyto dvě hardwarové části popsány. Veškerá uvedená schémata jsou vytvořena ve studentské verzi programu EAGLE 6.4.0 Professional.



Obr. 29 Blokové schéma měřicího systému

### 3.1 Řídicí a senzorový modul

Řídicí modul obstarává veškerou potřebnou výpočetní činnost měřicího systému a zajišťuje datové propojení mezi tímto systémem a počítačem přes USB rozhraní. Dále modul umožňuje zobrazovat aktuální naměřená data na LCD displeji, kalibraci žhavených polovodičových senzorů, spínání žhavicích okruhů senzorů a ovládání měřicího systému pomocí ovládacích prvků. Na obrázku 30 je zkonstruovaný řídicí modul. V příloze B je schéma a návrh plošného spoje.



Obr. 30 Sestavený řídicí modul

Druhou částí měřicího systému je senzorový modul. Na něm jsou umístěny všechny čtyři senzory plynů a jeden senzor teploty. Senzorový modul je připojený k řídicímu modulu přes plochý kabel. Na obrázku 31 lze vidět sestavený senzorový modul. V příloze C je schéma a návrh plošného spoje.

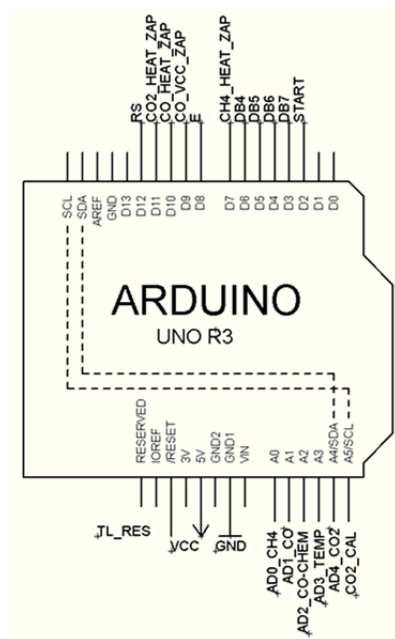


Obr. 31 Sestavený senzorový modul

#### 3.1.1 Připojení řídicí jednotky

Jak již bylo popsáno v kapitole 2.1 je Arduino UNO hlavním prvkem měřicího systému. Nachází se na řídicím modulu, ke kterému je připojený pomocí pinových lišt. Viz obrázek 30. Na

obrázku 32 je schéma zapojení řídicí jednotky s řídicím modulem. Funkce jednotlivých vývodů jsou popsány v tabulce 5.



Obr. 32 Zapojení jednotlivých pinů řídicí jednotky

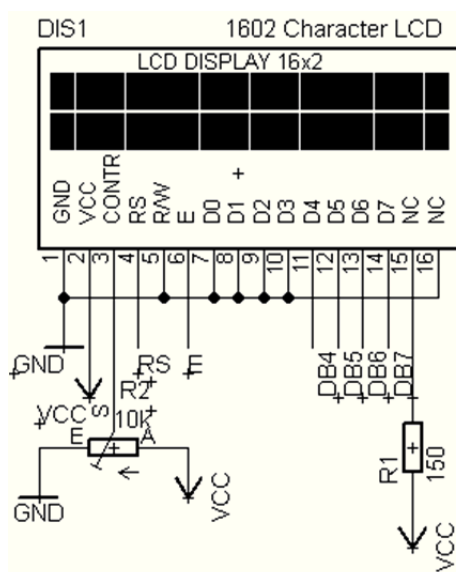
Tab. 5 Popis jednotlivých pinů řídicí jednotky

Pin	I/O	Funkce
D2	I	Přerušení INT0
D3	O	Data 7 z LCD displeje
D4	O	Data 6 z LCD displeje
D5	O	Data 5 z LCD displeje
D6	O	Data 4 z LCD displeje
D7	O	Spínání žhavení TGS2611
D8	O	Povolení přenosu dat do LCD displeje
D9	O	Sepnutí napájecího napětí TGS2442
D10	O	Spínání žhavení TGS2442
D11	O	Spínání žhavení TGS4161
D12	O	Zápis instrukcí nebo dat do LCD displeje
A0	I	Analogový signál z TGS2611
A1	I	Analogový signál z TGS2442
A2	I	Analogový signál z TGS5042
A3	I	Analogový signál z NTC termistor
A4	I	Analogový signál z TGS4161
A5	I	Analogový signál z kalibrace TGS4161
GND	O	Zem
5V	O	5 V
/RESET	I	Reset modulu

Řídicí jednotka disponuje USB konektorem typu B, ke kterému se připojuje datový kabel do PC. Přes USB port se jednotka programuje a také slouží k přenosu dat do PC. Do proudového odběru 500 mA lze přes USB port napájet měřicí systém, ale v tomto případě je proudový odběr velký a způsobuje příliš velký pokles napájecího napětí. Proto se jednotka napájí z externího napájecího zdroje o velikosti 7,5 V.

### 3.1.2 Připojení LCD displeje

LCD displej se nachází na řídicím modulu a je určený k zobrazování aktuálních naměřených hodnot koncentrace plynů a teploty ovzduší. Zapojení LCD displeje je na obrázku 33.



Obr. 33 Zapojení LCD displeje

LCD displej je připojený k řídicímu modulu pomocí pinové lišty a jednotlivý význam vývodů je v tabulce 6.

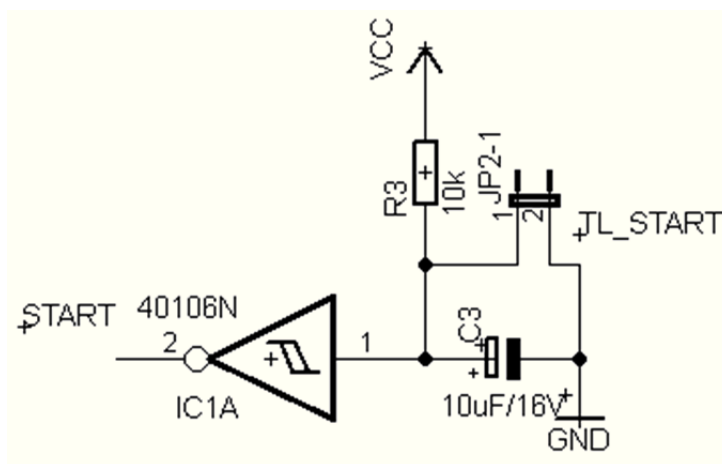
Tab. 6 Popis pinů LCD displeje

Pin	Jméno	Funkce	Zapojení
1	VSS	Zem	GND
2	VDD	Napájecí napětí +5V	VCC
3	VO	Nastavení kontrastu	Trimer R2
4	RS	0 = Zápis instrukcí 1 = Zápis dat	D12
5	R/W	0 = Zápis do LCD 1 = Čtení z LCD	GND
6	E	Povolení přenosu	D8
7-10	DB0-DB3	Data 0 (LSB) – Data 3	GND
11-14	DB4-DB7	Data 4 – Data 7 (MSB)	D3-D6
15	LED	LED podsvícení anoda	VCC
16	LED	LED podsvícení katoda	GND

### 3.1.3 Připojení ovládacích prvků a ventilátoru

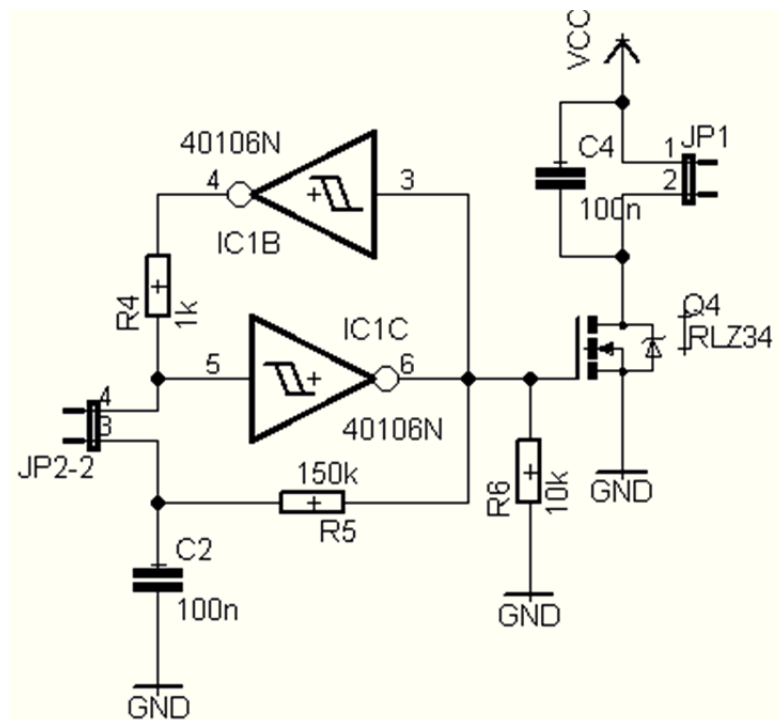
Měřicí systém má celkem tři ovládací prvky. Jedná se o spuštění a vypínání měření, spínání ventilátoru a tlačítka reset pro vyresetování měřicího systému. Obvody pro ovládací prvky jsou umístěny na řídicím modulu.

Na obrázku 34 je zapojení ovládacího obvodu pro spuštění a ukončení měření. Zapojení je realizované jedním Schmittovým obvodem IC1A. Na vstup obvodu IC1A je připojený elektrolytický kondenzátor C3, který je uzemněný. Kondenzátor je nabíjený přes pull-up rezistor R3. Na konektor JP2-1 se připojí tlačítko, které po stisknutí vybijí kondenzátor C3 a na výstupu IC1A, který je připojený na pin D2 (START) řídicí jednotky, je log. 1. Tento obvod se používá pro odrušení zákmitů při stisku tlačítka.



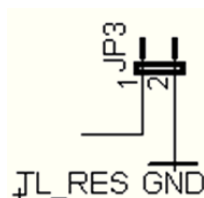
Obr. 34 Schéma zapojení ovládajícího tlačítka

Druhý obvod na obrázku 35 umožňuje jednotlačítkové zapínání a vypínání ventilátoru. Základ obvodu tvoří dvě hradla Schmittova obvodu IC1B a IC1C. Na konektor JP1 se připojí ventilátor, který je odrušený kondenzátorem C4. Na kladný pól ventilátoru se připojí napětí VCC (+5V). Na konektor JP2-2 se připojí tlačítko, které po stisku přepoklopí výstupní logickou úroveň. Při log. 1 na výstupu hradla IC1C se sepne tranzistor Q4, který je napojený na záporný pól ventilátoru a uzemní obvod (proud může protékat). Pro udržení log. 0 při neseptutém stavu tranzistoru se ovládací vstup uzemní přes pull-down rezistor R6.



Obr. 35 Schéma zapojení ovládání ventilátoru

Na obrázku 36 je konektor JP3, na který se připojí resetovací tlačítko. Kontakt č. 1 je připojený na vstup /RESET řídicí jednotky. Druhý kontakt je uzemněný. Po stisku tlačítka se na vstupu /RESET objeví log. 0 a MCU se vyresetuje.



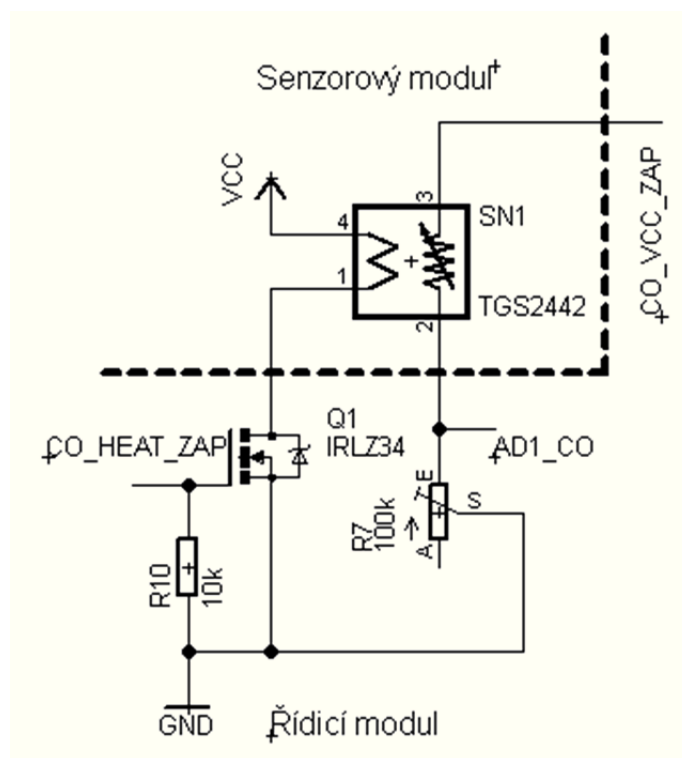
Obr. 36 Schéma zapojení konektoru pro RESET

### 3.1.4 Připojení senzorů

Samotné senzory jsou umístěny na sensorovém modulu, ale důležité části pro správnou funkci senzorů se také nacházejí na řídicím modulu. Jedná se o kalibrační prvky a spínače odporového ohřevu. Proto jsou pro lepší přehlednost zakresleny prvky z řídicí a sensorové části do jednoho schématu.

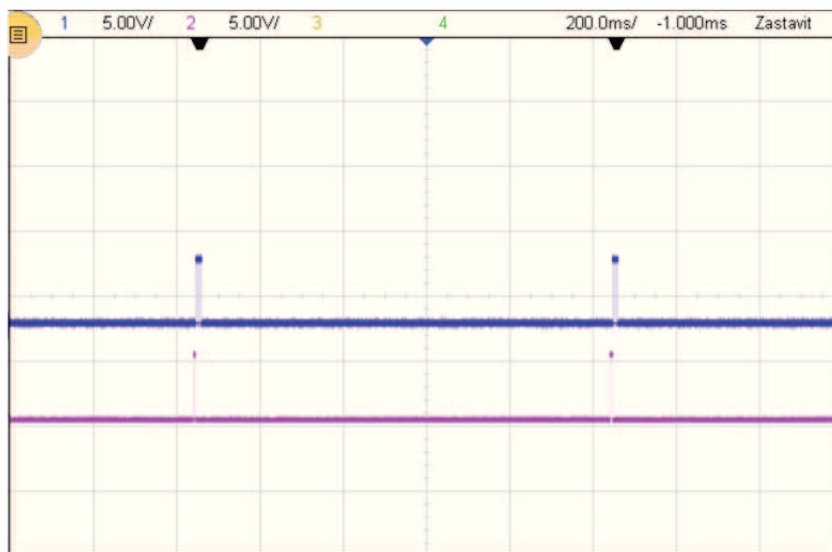
#### Připojení TGS2442

Schéma připojení CO senzoru TGS2442 je na obrázku 37. Piny č. 2 a č. 3 tvoří proměnlivý rezistor (snímací vrstva) v závislosti na koncentraci CO v ovzduší. Pin č. 2 je připojený k A/D převodníku A1 (AD1\_CO) spolu s trimrem R7. Tento trimer slouží ke kalibraci senzoru. Na pin č. 3 se přivádí v určitých intervalech log. 1 (+5V) vývodem z MCU D9 (CO\_VCC\_ZAP), která umožňuje průchod proudu snímací vrstvou pouze v předem daných intervalech.

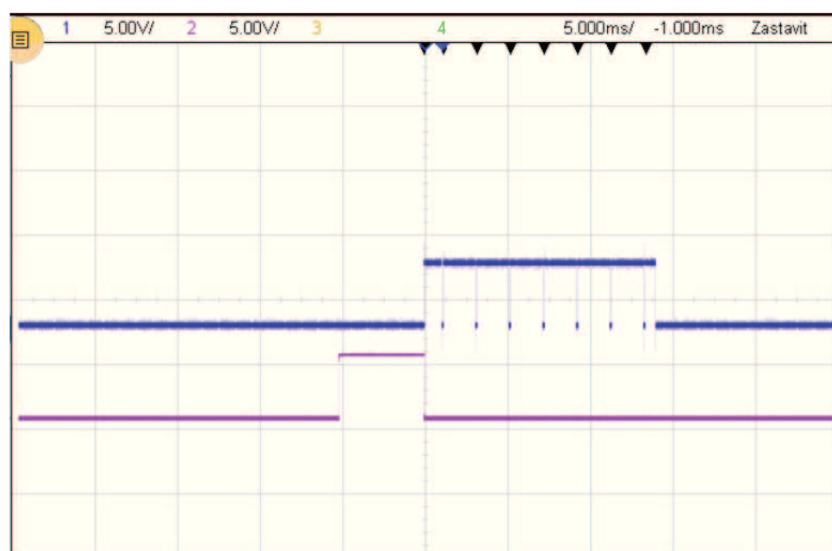


Obr. 37 Schéma zapojení senzoru TGS2442

Piny č. 1 a č. 4 tvoří interní odporový ohřev senzoru. Na pin č. 4 se připojí kladné napětí VCC. Na pin č. 1 je připojený spínací tranzistor Q1, který je spínán impulsem z pinu D10 (CO\_HEAT\_ZAP) z řídicí jednotky. Pro udržení log. 0 na vývodu, když není tranzistor sepnutý, je vývod uzemněn pull-down rezistorem R10. Při sepnutí tranzistoru je odporový ohřev uzemněný a může jím procházet proud. Jelikož je doporučené napájení odporového ohřevu 4,8 V, je tranzistor spínáný PWM signálem o střídě 96 %. Na obrázku 38 je zobrazený průběh spínací sekvence odporového ohřevu a napájení senzitivní vrstvy. Modrý průběh je spínání žhavení a fialový průběh je spínání průchodu napájecího napětí snímací vrstvou senzoru. Na dalším obrázku 39 je detail spínání odporového ohřevu.



Obr. 38 Průběh spínací sekvence

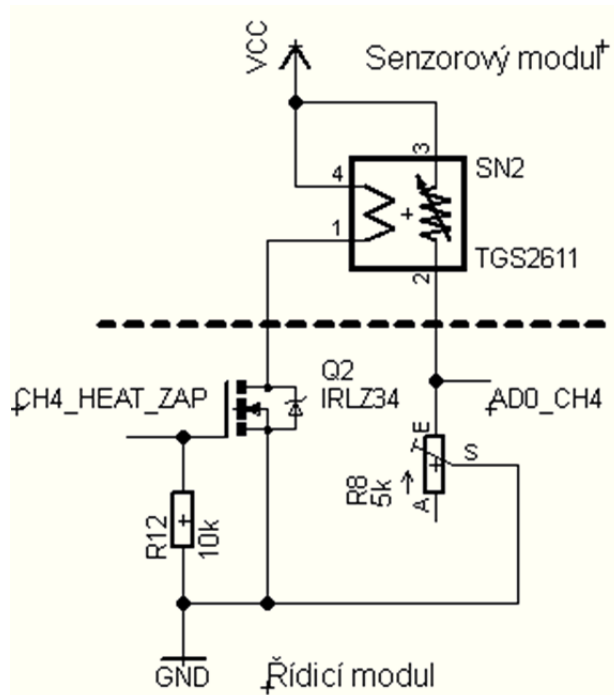


Obr. 39 Detail spínání

### Připojení TGS2611

Schéma připojení CH<sub>4</sub> senzoru TGS2611 je na obrázku 40. Zapojení má podobné jako výše uvedený senzor. Piny č. 1 a č. 4 také tvoří odporový ohřev a zbylé (č. 2 a č. 3) senzitivní vrstvu. Na piny č. 4 a č. 3 je připojené napájecí napětí VCC (+5V). Pin č. 2 je připojený k A/D převodníku A0 (AD0\_CH4) spolu s trimrem R8, sloužícího ke kalibraci. Pin č. 1 je zapojený stejně jako u senzoru TGS2442. Spínaný je vývodem z MCU D7 (CH4\_HEAT\_ZAP) a nejsou vyžadovány žádné spínací cykly ohřevu. Ohřev je při měření sepnutý stále.





Obr. 40 Schéma zapojení senzoru TGS2611

### Připojení TGS4161

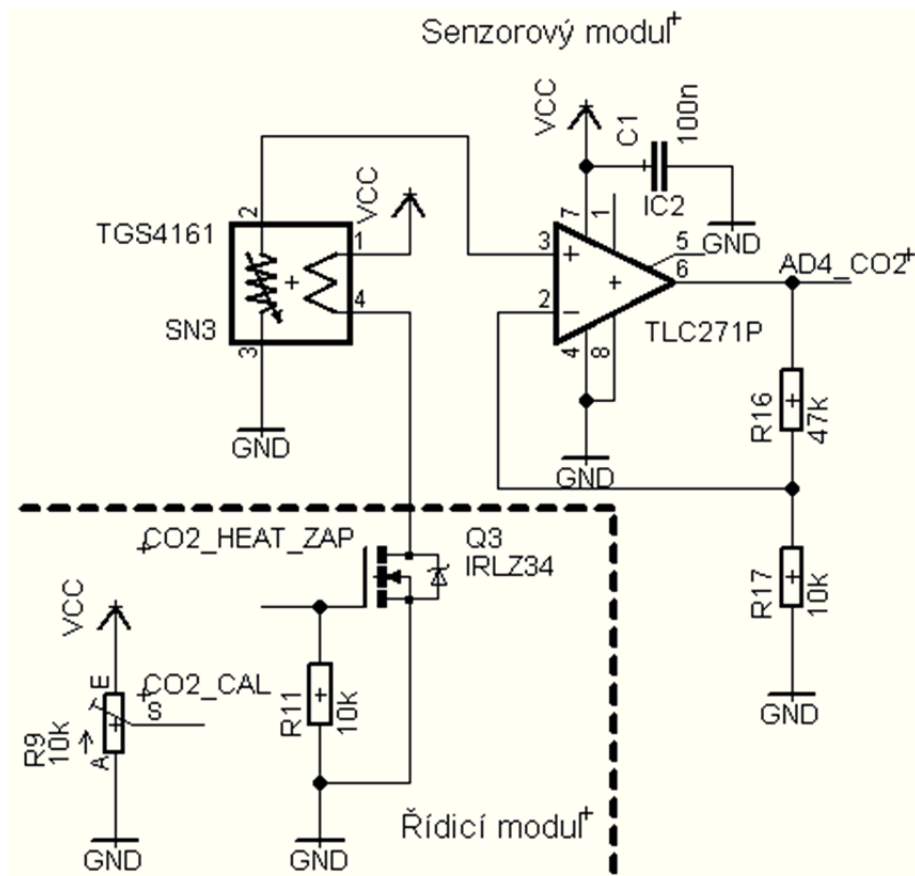
Schéma připojení CO<sub>2</sub> senzoru TGS4161 je na obrázku 41. Tento typ senzoru má stejný způsob ohřevu jako u dvou předešlých senzorů (TGS2442 a TGS2611). Ohřev je spínáný vývodem z řídicí jednotky D11 (CO<sub>2</sub>\_HEAT\_ZAP) a při měření je ohřev stále zapnutý. Pin č. 3 je uzemněný a pin č. 2 je připojený na neinvertující vstup operačního zesilovače IC2, který je zapojený jako sledovač napětí se zesilením. Zpětná vazba OZ je tvořena rezistory R16 a R17. Podle rovnice (3.1) se vypočítá výsledné zesílení OZ.

$$A = \frac{1}{\frac{R_{17}}{R_{17} + R_{16}}} = \frac{1}{\frac{10}{10 + 47}} = \frac{1}{0,1754} = 5,7 \quad (3.1)$$

Kde je:

A – zesílení

Výstup z OZ je přivedený na A/D převodník A4 (AD4\_CO2). Trimerem R9 je prováděna kalibrace senzoru. Trimer je připojený na A/D převodník A5 (CO<sub>2</sub>\_CAL) a je určený k nastavení softwarové proměnné EMF1 (elektromotorické napětí při 350 ppm CO<sub>2</sub>) v rozmezí 200 až 500 mV.



Obr. 41 Schéma zapojení senzoru TGS4161

### Připojení TGS5042

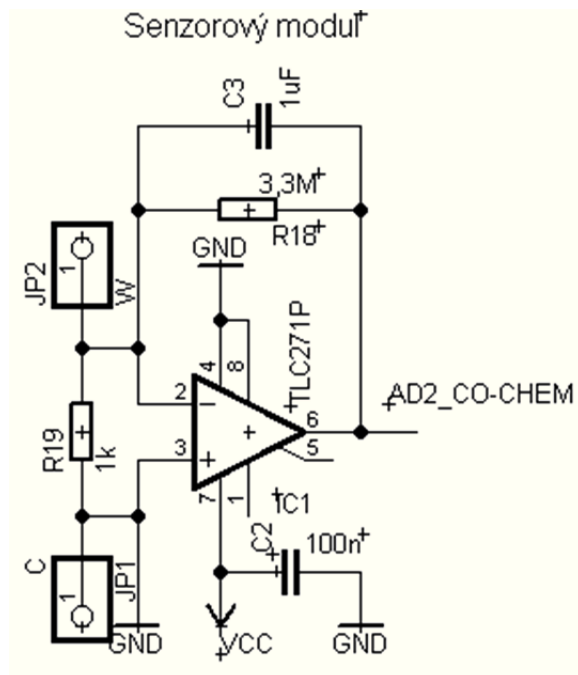
Schéma připojení CO senzoru TGS5042 je na obrázku 42. Pomocná elektroda C je uzemněna a připojena na neinverující vstup operačního zesilovače IC1. Pracovní elektroda W je připojena na inverující vstup OZ. Mezi elektrodou C a W je připojen anti-polarizační rezistor R19. OZ je zapojený jako převodník proudu na napětí. Ve zpětné vazbě je rezistor R18 a odrušovací kondenzátor C3. Převod z proudu na napětí je realizován podle vzorce (3.2).

$$U = I \cdot R_{18} \text{ (V)} \quad (3.2)$$

Kde je:

- U – výsledné napětí (V)
- I – vstupní proud (A)
- R18 – zpětnovazební rezistor ( $\Omega$ )

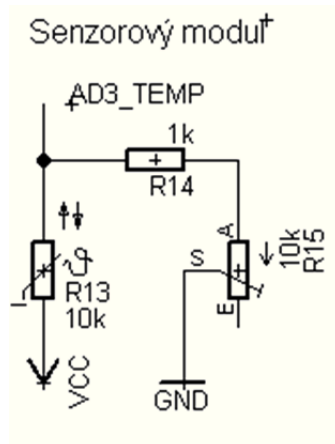
S použitým zesílením, které se rovná 3300000, lze měřit koncentrace CO v ovzduší do 783 ppm. Poté se operační zesilovač dostane do saturace ( $U_{sat} = 4,1 \text{ V}$ ). Výstup z operačního zesilovače je připojený na A/D převodník (AD2\_CO-CHEM).



Obr. 42 Schéma zapojení senzoru TGS5042

### Připojení NTC termistoru

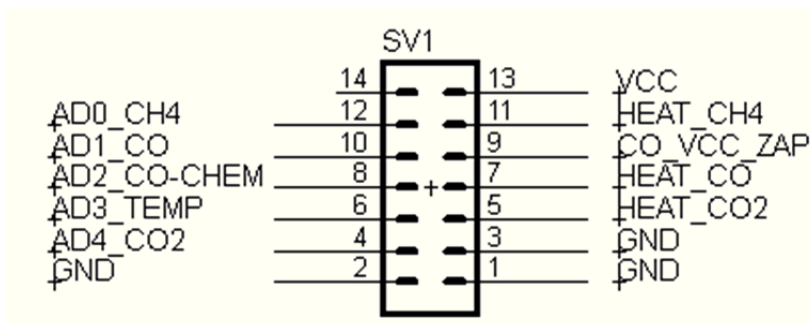
Schéma připojení NTC termistoru je na obrázku 43. NTC termistor je z jedné strany připojený na napájecí napětí VCC (+5V) a z druhé strany je připojený na A/D převodník A3 (AD3\_TEMP) spolu s pull-down rezistorem R14 a trimrem R15, který je určený ke kalibraci termistoru.



Obr. 43 Schéma zapojení NTC termistoru

### 3.1.5 Zapojení propojovacího konektoru

Propojovací konektor propojuje řídicí a senzorový modul. Zapojení konektoru SV1 je na obrázku 44. Je tvořený 14 pinovým konektorem MLW14G, který je stejný pro každý modul. Konektory jsou spojeny plochým kabelem. V tabulce 7 je popis jednotlivých pinů konektoru SV1.



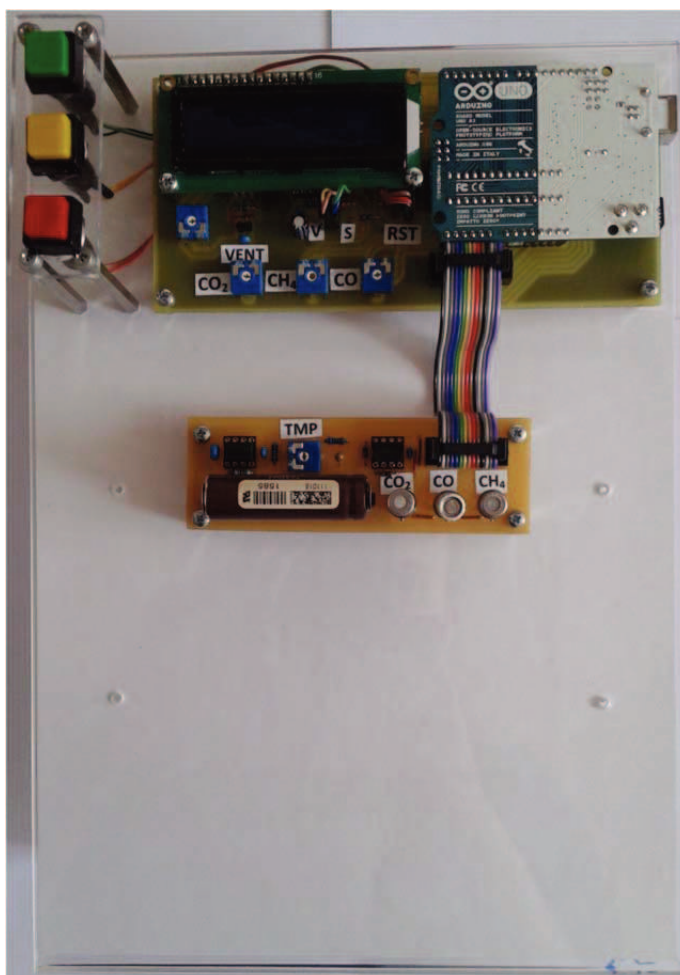
Obr. 44 Schéma zapojení vývodů konektoru

Tab. 7 Popis jednotlivých pinů konektoru

Číslo	Funkce
1	GND
2	GND
3	GND
4	Vývod na A/D 4
5	Spínání žhavení Q3
6	Vývod na A/D 3
7	Spínání žhavení Q1
8	Vývod na A/D 2
9	Vývod na D9
10	Vývod na A/D 1
11	Spínání žhavení Q2
12	Vývod na A/D 0
13	VCC (5 V)
14	-

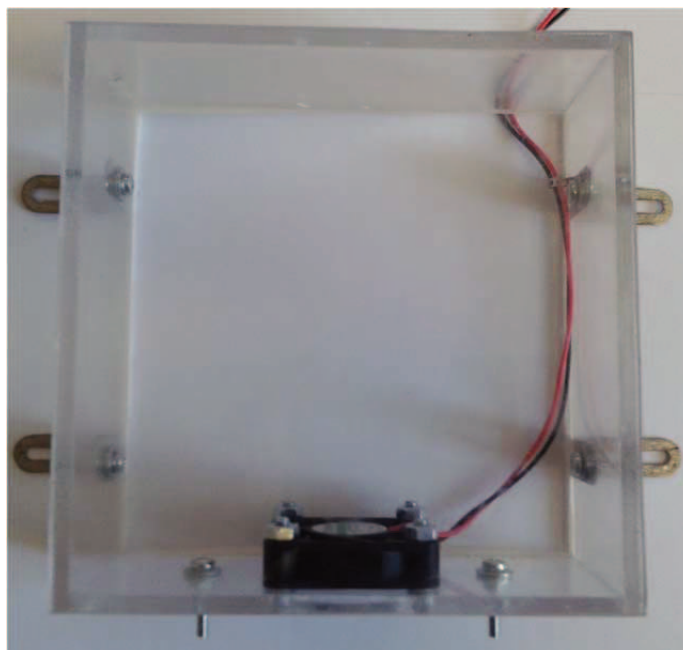
### 3.2 Mechanická konstrukce výukového modelu

Veškeré komponenty modelu jsou umístěny na panelu z plexiskla ve formátu A4, který je původně určený pro držení listu papíru. Na obrázku 45 je zobrazený panel s elektronikou. Plošné spoje jsou k panelu připevněny pomocí 10 mm distančních sloupků a panel s tlačítky pomocí 60 mm distančních sloupků. Návrh panelu pro ovládací tlačítka je uvedený v elektronické příloze F. Senzorickou desku následně překrývá plynová komora.

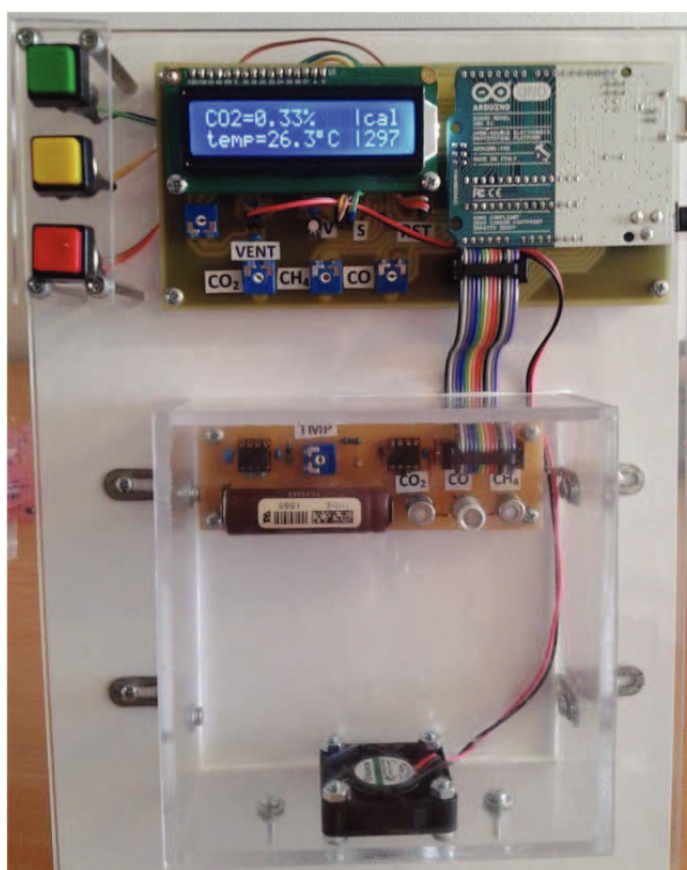


Obr. 45 Panel s přidělanou elektronikou

Plynová komora uvedená na obrázku 46 je vyrobena z pěti dílů 4mm plexiskla, které jsou k sobě slepeny. K panelu je uchycena pomocí čtyř šroubů umístěných na kovových úhelnících. Na spodní části plynové komory je umístěný ventilátor, který slouží pro vhánění měřeného plynu do komory, pro rovnoměrné promíchání plynu v komoře a k vyvětrání měřeného plynu z komory. Ventilátor dle potřeby překrývá těsnicí zátka pro zamezení úniku plynu ventilačním otvorem. Na spodní straně jednotlivých dílů z plexiskla je přilepené těsnění pro zamezení úniku plynu z komory. Návrhy jednotlivých dílů jsou uvedeny v elektronické příloze F. Na obrázku 47 je finální mechanická konstrukce výukového modelu.



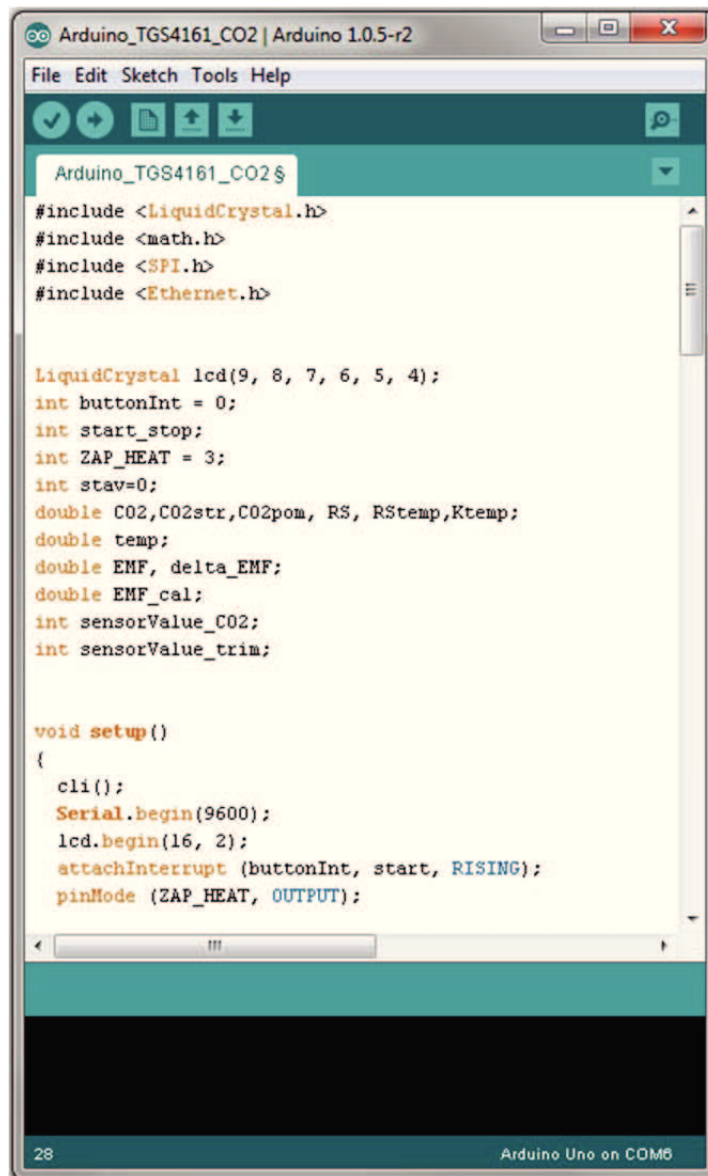
Obr. 46 Plynová komora



Obr. 47 Finální verze měřicího systému

## 4 SW návrh měřicího systému

Software pro ovládání měřicího systému je vytvořený ve vývojovém prostředí ARDUINO 1.0.5. Na obrázku 48 je ukázka vývojového prostředí. Jedná se o integrované vývojové prostředí, jehož nejvýraznější prvek je textový editor pro psaní kódu. V prostředí lze navolit používanou Arduino platformu a COM port, ke kterému je platforma připojena. Přes toto vývojové prostředí lze zdrojové kódy přímo nahrávat do platformy.



```
Arduino_TGS4161_CO2 | Arduino 1.0.5-r2
File Edit Sketch Tools Help
Arduino_TGS4161_CO2$
#include <LiquidCrystal.h>
#include <math.h>
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>

LiquidCrystal lcd(9, 8, 7, 6, 5, 4);
int buttonInt = 0;
int start_stop;
int ZAP_HEAT = 3;
int stav=0;
double CO2,CO2str,CO2pom, RS, RStemp,Ktemp;
double temp;
double EMF, delta_EMF;
double EMF_cal;
int sensorValue_CO2;
int sensorValue_trim;

void setup()
{
  cli();
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
  attachInterrupt (buttonInt, start, RISING);
  pinMode (ZAP_HEAT, OUTPUT);
}
```

28 Arduino Uno on COM5

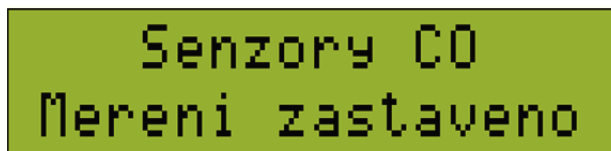
Obr. 48 Vývojové prostředí ARDUINO

Pro měřicí systém vznikly celkem tři řídicí softwary. První je program pro měření koncentrace CO a teploty v ovzduší. Druhý program je určený pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> a teploty v ovzduší a třetí program slouží k měření koncentrace metanu a teploty v ovzduší.

## 4.1 Řídicí software pro měření CO

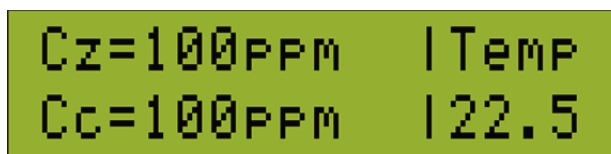
Tento program je určený pro měření koncentrace CO a teploty v ovzduší. Použité CO senzory jsou TGS2442 a TGS5042. Použité jsou dva CO senzory z důvodu porovnání jejich vlastností, jelikož každý funguje na jiném principu. Senzor teploty je zde pro teplotní kompenzaci CO senzorů. V elektronické příloze F je zdrojový kód řídicího softwaru.

Po připojení napájení se měřicí systém uvede do režimu, ve kterém je měření zastaveno a čeká na stisknutí tlačítka START. V tomto režimu je vypnutý odporový ohřev senzoru TGS2442. Na obrázku 49 je zobrazený úvodní popis na LCD displeji.



Obr. 49 Úvodní obrazovka CO senzoru

Po stisknutí tlačítka START se uvede měřicí systém do měřicího režimu, kde probíhá samotné měření koncentrace CO senzory TGS2442 a TGS5042 a teploty. Na dalším obrázku je zobrazena obrazovka LCD displeje v měřicím režimu.



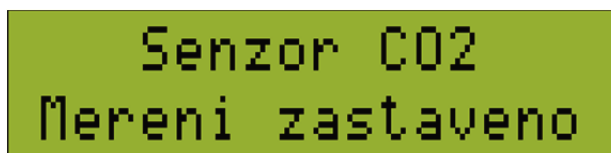
Obr. 50 Obrazovka displeje v měřicím režimu CO senzoru

Na displeji jsou zobrazeny koncentrace CO senzoru TGS2442 (Cz) a senzoru TGS5042 (Cc) v jednotkách ppm. V pravém okraji LCD displeje je zobrazena aktuální teplota ve stupních Celsia.

## 4.2 Řídicí software pro měření CO<sub>2</sub>

Tento zdrojový kód je navržený pro měření koncentrace CO<sub>2</sub> a teploty v ovzduší. Použitý senzor CO<sub>2</sub> je TGS4161. V elektronické příloze F je zdrojový kód řídicího softwaru.

Po připojení napájení do měřicího systému se uvede do stejného režimu jako u předešlého programu. Jednotka také čeká na stisknutí tlačítka START. Na obrázku 51 je zobrazená úvodní obrazovka na LCD displeji.



Obr. 51 Úvodní obrazovka CO<sub>2</sub> senzoru

Po stisknutí tlačítka START se měřicí systém přepne do měřicího režimu a začne měřit koncentraci CO<sub>2</sub> a teploty. Na obrázku 52 lze vidět obraz LCD displeje při měření.





Obr. 52 Obrazovka displeje v měřicím režimu CO<sub>2</sub> senzoru

Na displeji je zobrazená koncentrace CO<sub>2</sub> v jednotkách objemových procent a teplota v jednotkách Celsia. Dalším uvedeným údajem je velikost kalibrační proměnné EMF1 v milivoltech, která se nastavuje kalibračním trimrem R9.

### 4.3 Řídicí software pro měření metanu

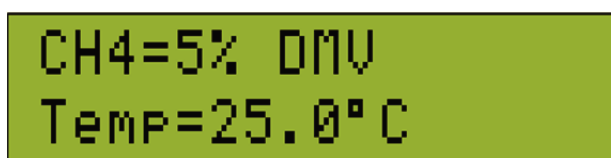
Tento program je určený pro měření DMV metanu a teploty v ovzduší. Použitý senzor metanu je TGS2611. V elektronické příloze F je zdrojový kód řídicího softwaru.

Po připojení napájení se měřicí systém uvede do režimu, ve kterém je měření zastaveno a čeká na stisknutí tlačítka START. Princip je stejný jako u předešlých dvou programů. Na obrázku 53 je úvodní obrazovka měřicího systému.



Obr. 53 Úvodní obrazovka CH<sub>4</sub> senzoru

Po stisknutí tlačítka START začne měřicí systém měřit koncentraci metanu a teplotu v ovzduší. Na obrázku 54 je zobrazena obrazovka LCD displeje v měřicím režimu.



Obr. 54 Obrazovka displeje v měřicím režimu CH<sub>4</sub> senzoru

Na displeji je zobrazena aktuální koncentrace metanu v jednotkách procent a teplota v jednotkách Celsia.

## 5 Kalibrace měřicího systému

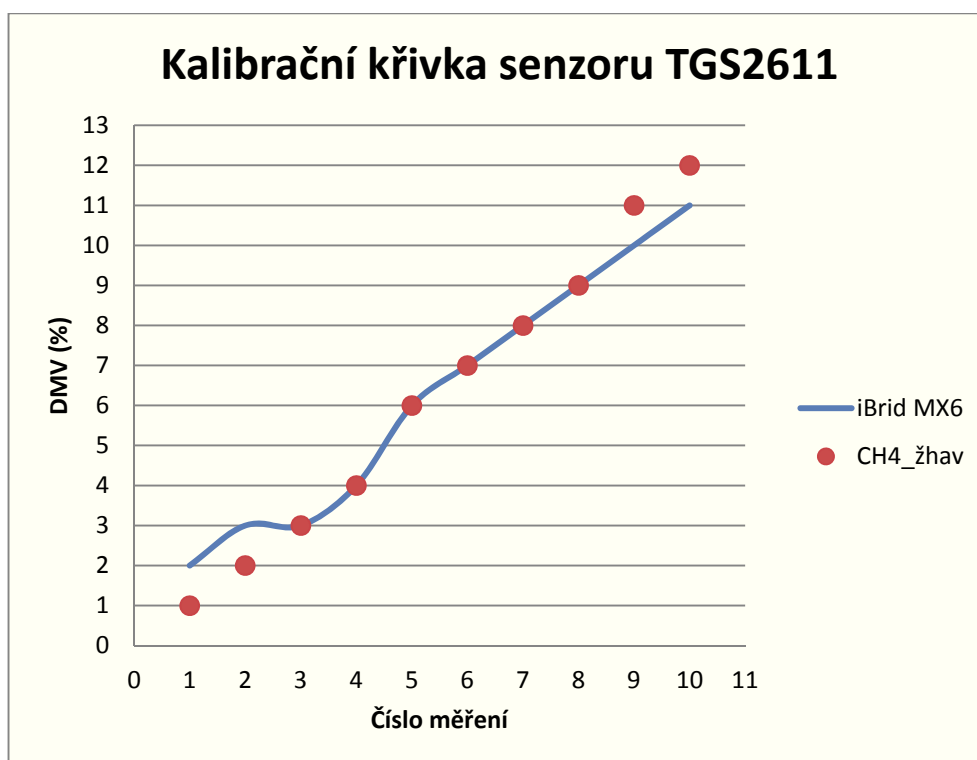
Nedílnou součástí měřicího systému je kalibrace. Bez kalibrace by se měřicí jednotka nedala plnohodnotně využívat. Ke kalibraci senzorů CO, CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> byl využit referenční přístroj iBrid MX6. Kalibrace probíhala v plynové komoře FIGARO SR3.

### 5.1 Kalibrace senzoru TGS2611

Jak již bylo výše napsáno, kalibrace probíhala v plynové komoře FIGARO SR3 za pomoci referenčního přístroje iBrid MX6. V plynové komoře je k dispozici ventilátor, který zajišťuje rovnoměrné promíchání měřeného plynu se vzduchem, tzn., že ve všech místech komory je stejná koncentrace plynu.

Jelikož nebyla čistá směs plynného metanu k dispozici, byl metan nahrazen zemním plynem, který obsahuje více jak 90 % metanu.

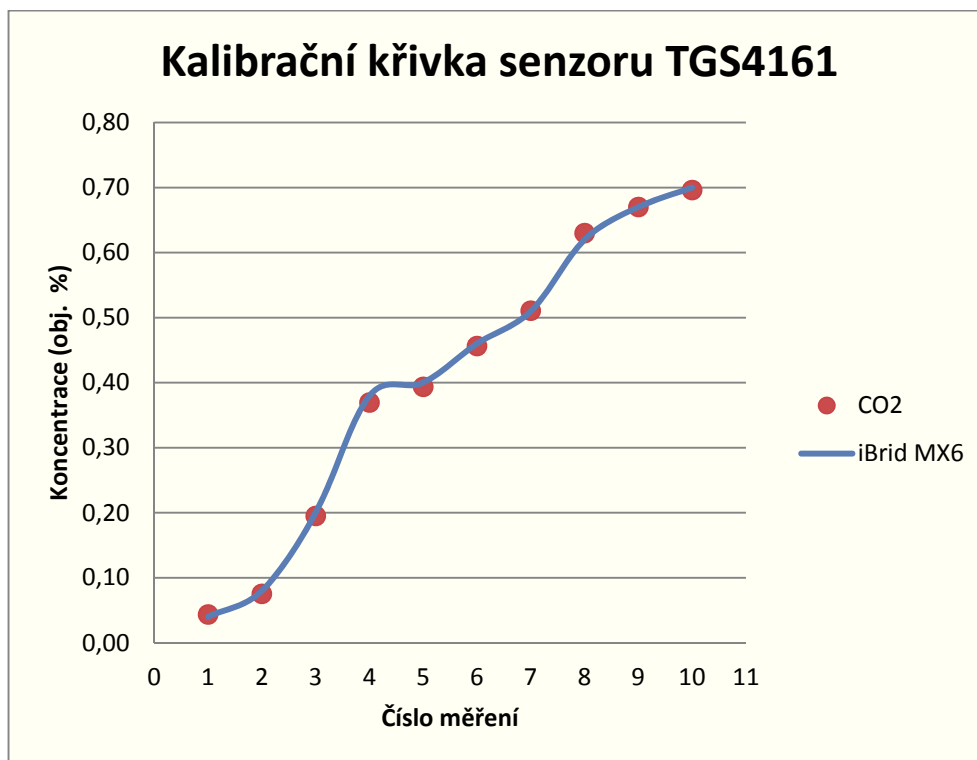
Samotná kalibrace probíhala tak, že se kalibrovaný senzor TGS2611 spolu s kompenzačním termistorem a kalibračním přístrojem iBrid MX6 se vložil do plynové komory. Následně se přidal zemní plyn a sepnul se ventilátor pro promíchání směsi. Mírným přidáváním nebo ubíráním zemního plynu byla snaha dosáhnout DMV 5 %. Jakmile kalibrační přístroj detekoval 5 % DMV, hodnoty na měřicím systému se nechaly ustálit a pomocí kalibračního trimru R8 se provedla korekce napětí snímaného A/D převodníkem. Na obrázku 55 je graf kalibrační křivky deseti měření při různých koncentracích metanu. Během kalibrace se nepodařilo dosáhnout shody ve všech bodech měření měřicího systému a kalibračního přístroje, avšak rozdíl byl maximálně 1 %.



Obr. 55 Kalibrační křivka senzoru TGS2611

## 5.2 Kalibrace senzoru TGS4161

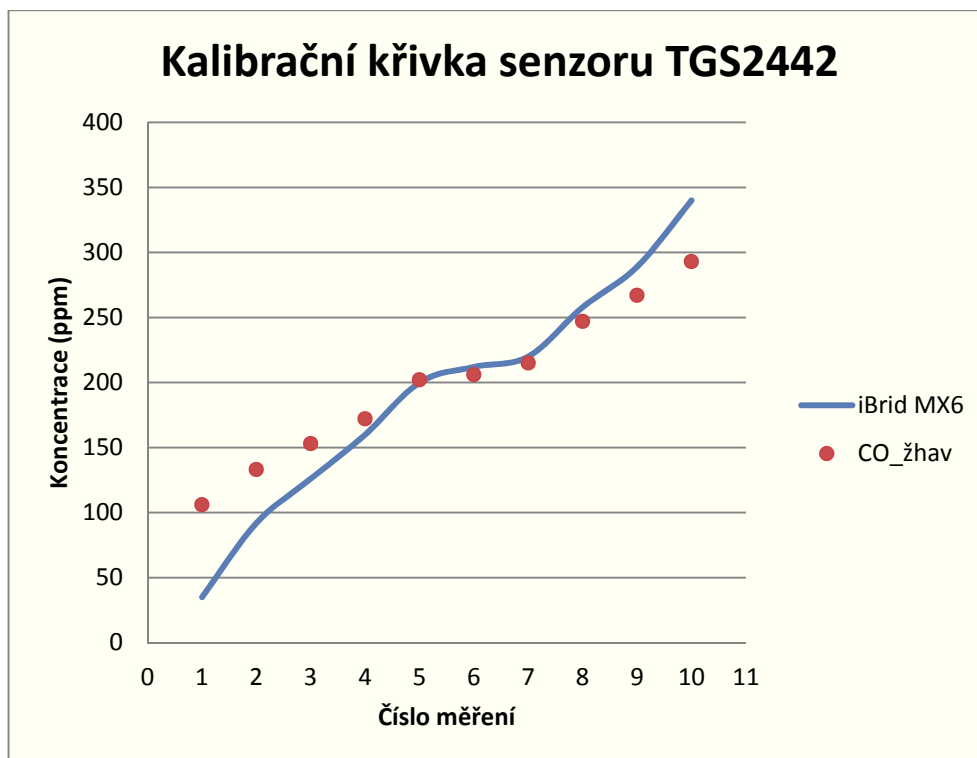
Při této kalibraci se používaly stejné přístroje a plynová komora jako u předchozího senzoru. Kalibrovaný senzor spolu s teplotním senzorem a kalibračním přístrojem se vložil do plynové komory, aby měření nebylo ovlivňováno vydechovaným vzduchem člověka. Hodnoty na kalibračním a měřicím systému se nechaly ustálit a pomocí kalibračního termistoru R9 se nastavila kalibrační konstanta EMF1. Na obrázku 56 je graf kalibrační křivky deseti měření pro různé koncentrace CO<sub>2</sub>, kdy jako zdroj CO<sub>2</sub> se využíval vydechovaný vzduch člověka. Lze vidět, že rozdíl mezi naměřenými hodnotami je velmi malý (maximálně 0,01 %) nebo žádný.



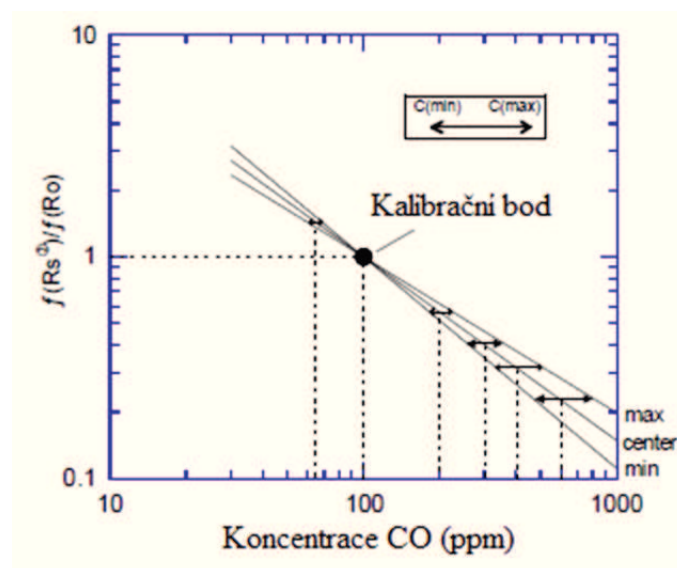
Obr. 56 Kalibrační křivka senzoru TGS4161

## 5.3 Kalibrace senzoru TGS2442

Při kalibraci TGS2442 byly použity stejné kalibrační pomůcky jako v předchozích kalibracích. Kalibrovaný senzor spolu s teplotním senzorem a kalibračním přístrojem se vložil do plynové komory. Jelikož nebylo k dispozici čisté plynné CO, bylo dle doporučeného postupu nalezeného v literatuře, použito jako výstup hoření vonné tyčinky. Jakmile kalibrační přístroj detekoval 200 ppm CO, vonná tyčinka byla z plynové komory vyjmuta. Hodnota na měřicím systému se nechala ustálit a po ustálení se provedla korekce kalibračním trimrem R7 snímaného napětí A/D převodníkem. Na obrázku 57 je graf kalibrační křivky deseti měření pro různé koncentrace CO. Na grafu lze vidět, že naměřené hodnoty se shodují kolem bodu kalibrace, ale čím více se vzdalují od tohoto bodu, tím větší nepřesnost vzniká. Podle technické dokumentace je tento jev v pořádku a na obrázku 58 je graf rozptylu hodnot.



Obr. 57 Kalibrační křivka senzoru TGS2442

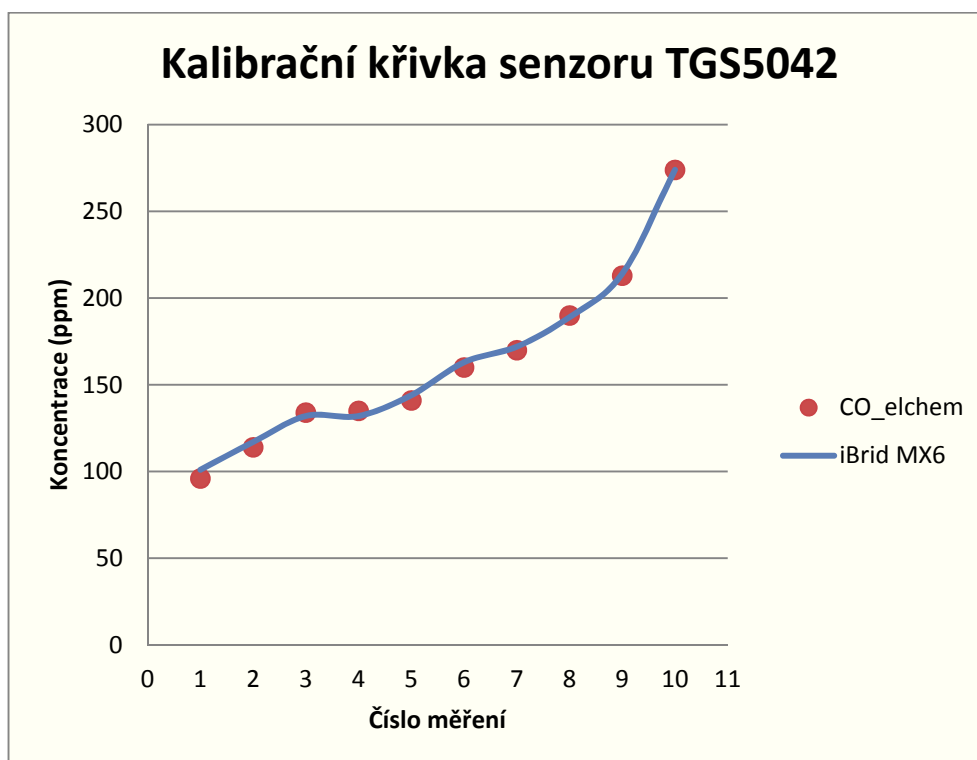


Obr. 58 Rozptyl hodnot senzoru TGS2442 [9]

## 5.4 Kalibrace senzoru TGS5042

Postup kalibrace senzoru TGS5042 je totožný jako u senzoru TGS2442, ale je zde navíc možnost provádět kalibraci dvěma způsoby, a to hardwarovým nebo softwarovým způsobem. Hardwarový postup spočívá nahrazením rezistoru R18 za trimmer, který by se nastavil na stejnou hodnotu, jako je použita ve zdrojovém kódu. Druhý postup je softwarový, který je použitý v tomto případě, kdy rezistor R18 je pevný a jeho hodnota se zapisuje do proměnné ve zdrojovém kódu. Na

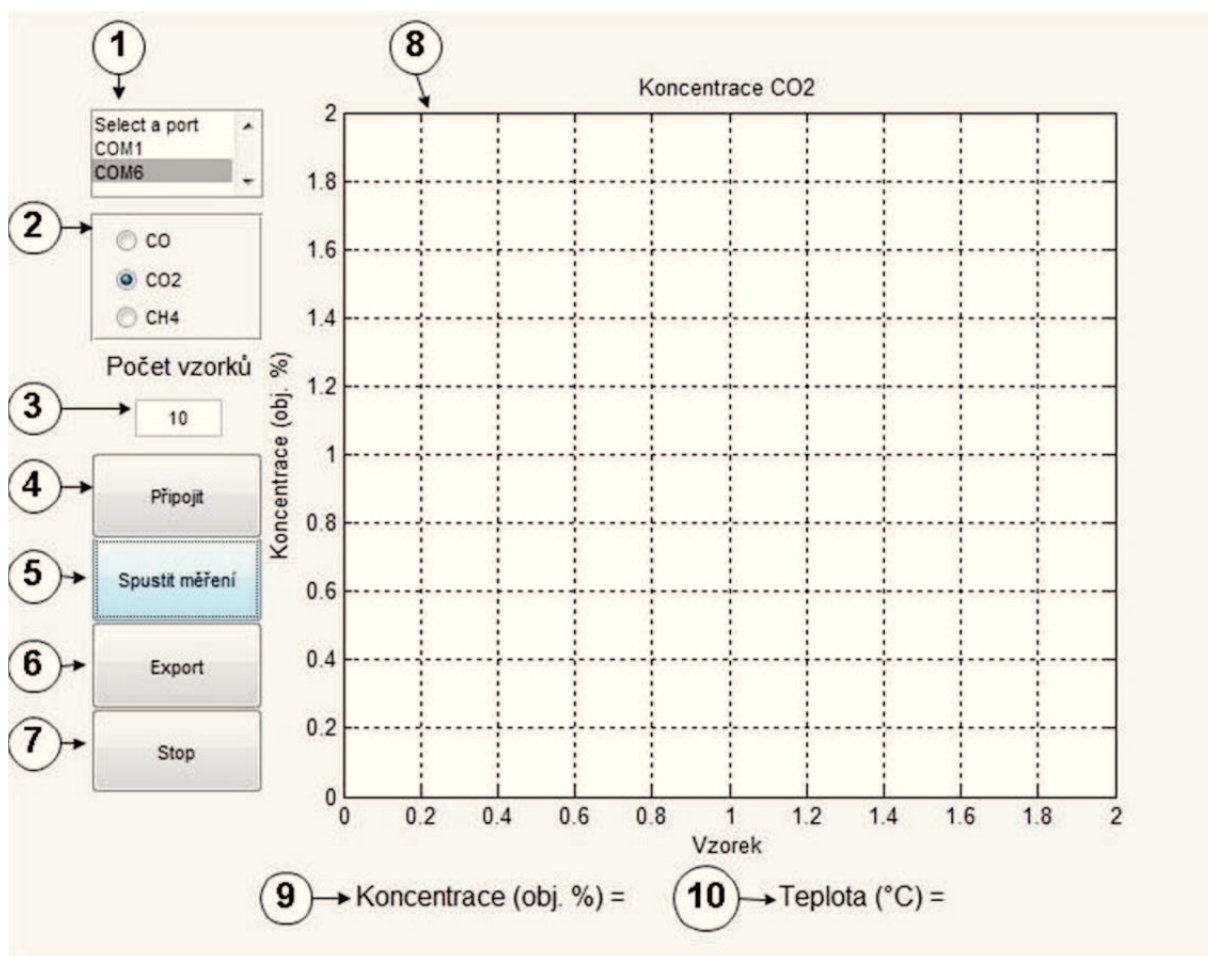
obrázku 59 je zobrazený kalibrační graf pro různé koncentrace CO. Naměřené hodnoty jsou takřka stejné a liší se maximálně o 5 ppm.



Obr. 59 Kalibrační křivka senzoru TGS5042

## 6 Vizualizace

Abyste bylo možné naměřená data vizualizovat v grafu a případně je i exportovat do určitého formátu k dalšímu zpracování, musela vzniknout vizualizace, která splňuje výše uvedené požadavky. Jako vizualizační prostředek byl vybrán Matlab. Jednou z možností je vše ovládat přes příkazový řádek v Matlabu, to je však nepraktické, a proto se využila jedna z funkcí Matlabu ke tvorbě grafického uživatelského rozhraní (GUI). Celé rozhraní se skládá z jedné hlavní obrazovky (Obr. 60), kde největší dominantou je graf k zobrazování naměřených hodnot koncentrace plynů. V následujících řádcích jsou stručně popsány jednotlivé prvky vizualizace.



Obr. 60 Hlavní vizualizační obrazovka

Jednotlivé prvky vizualizace jsou:

- volba COM portu, ze kterého vizualizace bude přijímat data (1)
- volba měřeného plynu (2)
- nastavení počtu vzorků, které se odeberou (3)
- připojení se ke zvolenému COM portu (4)
- spuštění měření (5)
- export naměřených dat do Excelu (6)
- ukončení měření a odpojení od COM portu (7)

- grafické vyjádření naměřené koncentrace plynů jednotlivých vzorků (8)
- zobrazená aktuální koncentrace plynů (9)
- zobrazení aktuální teploty ovzduší (10)

Vizualizace se spouští skriptem Vizualizace.m. Po spuštění se zobrazí hlavní vizualizační panel. Uživatel si může vybrat, ke kterému COM portu se připojí a jaký plyn bude měřit. Volba měřeného plynu je zde proto, aby se změnil popisky os grafu, hlavička exportovaných dat do Excelu a taky počet průběhů, které graf zobrazí. Například u měření CO graf zobrazuje dva průběhy (data ze dvou senzorů), ale u měření CO<sub>2</sub> a CH<sub>4</sub> se zobrazuje jen jeden. Dále uživatel zadává maximální počet vzorků, které má vizualizace odebrat.

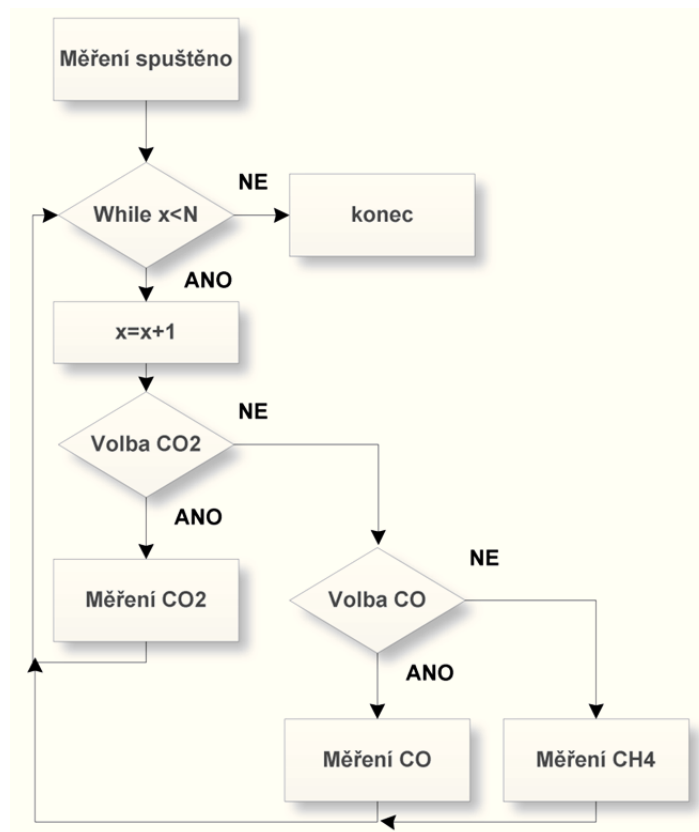
Tlačítkem *Připojit* se vizualizace připojí ke zvolenému COM portu a nastaví parametry přenosu.

Tlačítkem *Spustit měření* se na základě zvoleného plynu spustí měření po dobu, než se vypne tlačítkem *Stop* nebo než dosáhne hranice zadaných vzorků. Po stisku tlačítka *Stop* se musí při dalším použití vizualizace připojit ke COM portu tlačítkem *Připojit*.

Posledním ovládacím prvkem je tlačítko *Export*, které exportuje naměřená data po skončení měření nebo i v průběhu měření do Excelu v závislosti na zvoleném plynu, který se měří.

## 6.1 UML diagram cyklu měření vizualizace

Na obrázku 61 je zobrazený UML diagram, který znázorňuje princip funkce měřicího cyklu vizualizace.



Obr. 61 UML diagram měřicího cyklu vizualizace

Měření je započato stisknutím tlačítka *Spustit měření*. Do proměnných se načte zadaný počet vzorků a vybraný měřený plyn. V hlavním cyklu se každým jeho průběhem inkrementuje proměnná  $x$  a cyklus probíhá tak dlouho, dokud proměnná  $x$  je menší než počet zadaných vzorků  $N$ . Jaký měřený plyn byl zvolen je kontrolováno podmínkami v hlavním cyklu. Po skončení cyklu lze nastavit nové měření a spustit jej.

## 6.2 Export naměřených dat

Data se exportují stiskem tlačítka *Export*. Při stisku se na základě vybraného měřeného plynu spustí skript, který zajistí vyexportování dat do Excelu. Skripty pro ukládání jsou celkem tři a liší se pouze hlavičkou pro daný měřený plyn, popřípadě počtem vyexportovaných proměnných.

Před uložením dat do Excelu se zkontroluje, zda jsou data uložena ve sloupci funkcí *isrow()*. Pokud ano, vytvoří se soubor DataCO.xls (Excel pro naměřená data oxidu uhelnatého) a data se uloží. Na obrázku 62 je příklad uložených dat do Excelu. Jestliže jsou data v řádku, převertují se do sloupce a poté se uloží do Excelu. Pokud už je ve stejné složce soubor se stejným názvem, přepíše se. Dalším novým měřením se předchozí naměřená data přepíše

	A	B	C	D
1	CO_chem (ppm)	CO_zhav (ppm)	Teplota (°C)	vzorek
2	1	7	21,6	1
3	2	5	21,6	2
4	1	5	21,6	3
5	2	5	21,6	4
6	2	4	21,5	5
7	2	4	21,4	6
8	2	4	21,4	7
9	2	4	21,3	8
10	2	4	21,3	9
11	2	4	21,4	10

Obr. 62 Příklad uložených dat v Excelu



## 7 Nejistoty měření a statistika

Pro každé měření je potřebné zjistit přesnost, s jakou bylo měření provedeno. K této problematice vznikly tzv. nejistoty měření, které vyjadřují interval, ve kterém se s největší pravděpodobností nachází skutečná hodnota. Rozlišujeme nejistotu typu A a typu B, kde jejich sloučením vznikne nejistota typu C. Veškeré rovnice, které jsou zde použity, jsou převzaty ze zdroje [20].

Nejistota typu A je způsobena nahodilými chybami. Vychází ze statistické analýzy série naměřených hodnot, kterých by mělo být alespoň 10 za stejných podmínek měření (tlak, teplota, atd.), kde se odhadne výsledná hodnota aritmetickým průměrem (7.1).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7.1)$$

Kde je:

- $\bar{x}$  – aritmetický průměr
- n – počet měření
- i – iterace
- $x_i$  – i-tá naměřená hodnota

Poté se nejistota typu A vypočítá podle následujícího vzorce (7.2).

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.2)$$

Kde je:

- $u_A$  – nejistota typu A
- n – počet měření
- i – iterace
- $x_i$  – i-tá naměřená hodnota
- $\bar{x}$  – aritmetický průměr

Pokud je naměřeno méně jak 10 měření, je nejistota méně spolehlivá a je nutné výslednou chybu vynásobit koeficientem uvedeným v tabulce 8.

Tab. 8 Korekční tabulka

n	9	8	7	6	5	4	3	2
$k_s$	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7

Nejistota typu B se určuje jiným než statistickým způsobem. Neprojevuje se na měření náhodnými chybami, jako je tomu u nejistoty typu A, ale projevuje se trvalým výskytem. Tyto chyby

vznikají ze známých příčin, jako jsou chyby vázané na měřicím přístroji, vliv prostředí, vliv metody měření a vliv uživatele měřicího systému. Nejistota typu B se vypočítá podle vzorce (7.3).

$$u_B = \frac{\text{Nejistoty}}{k} \quad (7.3)$$

Kde je:

- $u_B$  – nejistota typu B
- $k$  – typ aproximačního rozdělení

Jelikož v praxi si nelze vystačit pouze s jednou nejistou, tak posledním typem nejistoty je nejistota typu C, která je kombinací nejistot typu A a typu B. Podle níže uvedeného vzorce (7.4) se vypočítá kombinovaná nejistota typu C.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (7.4)$$

Kde je:

- $u_C$  – nejistota typu C
- $u_A$  – nejistota typu A
- $u_B$  – nejistota typu B

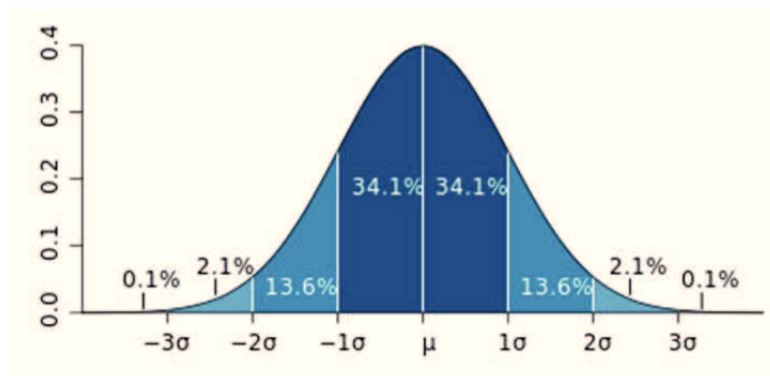
Výsledná směrodatná odchylka představuje u normálního rozdělení interval s pravděpodobností cca 68 %. Pokud tato hodnota je nedostatečná, lze ji rozšířit vynásobením odchylky koeficientem  $k_r$  podle vzorce (7.5). Pro rozšíření na 95 % se  $k_r$  rovná 2 a pro 99,7 % se rovná 3.

$$U = k_r \cdot u \quad (7.5)$$

Kde je:

- $U$  – rozšířená nejistota
- $k_r$  – koeficient rozšíření
- $u$  – standardní nejistota

Nejrozšířenější statistické zpracování naměřených dat se provádí pomocí normálního (Gaussova) rozdělení. Jedná se o grafické znázornění pravděpodobnosti výskytu hodnot, se kterými se lze setkat. Na obrázku 63 je ukázka normálního rozdělení.



Obr. 63 Normální rozdělení [19]

Pokud tedy máme koeficient rozšíření  $k_r$  rovno jedné, tak 68 % hodnot se musí nacházet v intervalu  $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ . Když se  $k_r = 2$ , tak 95 % hodnot se musí nacházet v intervalu  $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ . A v posledním případě, kdy se  $k_r = 3$ , tak 99,7 % hodnot spadá do intervalu  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ . Normální rozdělení je vyjádřeno vzorcem (7.6).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} \quad (7.6)$$

Kde je:

- $\sigma$  – směrodatná odchylka
- $\sigma^2$  – rozptyl
- $\mu$  – střední hodnota
- $x$  – zadaná hodnota

Směrodatná odchylka vypovídá o tom, jak moc se naměřené hodnoty liší od průměrných hodnot. Pokud je směrodatná odchylka malá, hodnoty si jsou navzájem podobné. Při velké směrodatné odchylce jsou mezi hodnotami velké odlišnosti. Podle vzorce (7.7) se vypočítá směrodatná odchylka.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7.7)$$

Kde je:

- $\sigma$  – směrodatná odchylka
- $n$  – počet prvků
- $x_i$  –  $i$ -tá naměřená hodnota
- $\bar{x}$  – aritmetický průměr

Rozptyl udává, jak moc jsou naměřené hodnoty rozptýleny. Podle vzorce (7.8) se vypočítá rozptyl.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (7.8)$$

Kde je:

$\sigma^2$  – rozptyl

$n$  – počet prvků

$x_i$  –  $i$ -tá naměřená hodnota

$\bar{x}$  – aritmetický průměr

## 7.1 Nejistota měření senzoru TGS2442

Bylo naměřeno 10 hodnot při stejných podmínkách. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 9. V následujících řádcích jsou vypočteny nejistoty typu A, B, C a rozšířená nejistota U. Dále je vytvořen graf normálního rozdělení. Rozlišení měřicího systému do 250 ppm CO je 1 ppm a od 250 ppm je rozlišení 2 ppm. Výsledná přesnost tohoto senzoru je platná pouze v bodu kalibrace a v blízkém okolí viz kapitola 5.3.

Tab. 9 Naměřené hodnoty senzoru TGS2442

i	$x_i$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	203	5,76
2	201	0,16
3	199	2,56
4	202	1,96
5	201	0,16
6	203	5,76
7	198	6,76
8	201	0,16
9	198	6,76
10	200	0,36
suma	2006	30,4

Abychom mohli vypočítat nejistotu typu A, musíme nejdříve vypočítat aritmetický průměr naměřených hodnot.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{2006}{10} = 200,6 \text{ ppm}$$

Nejistota typu A.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = u_A = \sqrt{\frac{1}{10 \cdot (10 - 1)} \cdot 30,4} = \sqrt{0,0111 \cdot 30,4} = 0,58 \text{ ppm}$$

Nejistotu typu B je náročné určit. Zde je vycházeno z technických specifikací NTC termistoru kvůli teplotní kompenzaci senzoru (0,75 %), chyby převodu A/D převodníku (0,2 %) a chyby referenčního napětí (1 %). Součtem a zaokrouhlením celkových chyb lze dostat celkovou chybu údaje 2 %. Je zvoleno rovnoměrné rozdělení  $k = \sqrt{3}$ .

$$u_B = \frac{\text{Nejistoty}}{k} = \frac{4,012}{\sqrt{3}} = 2,32 \text{ ppm}$$

Z nejistoty typu A a B můžeme určit nejistotu typu C.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,58^2 + 2,32^2} = 2,39 \text{ ppm}$$

Nejistotu C lze ještě rozšířit vynásobením koeficientu  $k_r=2$  pro pokrytí normálního rozdělení 95 %.

$$U = k_r \cdot u_C = 2 \cdot 2,39 = 4,78 \doteq 5 \text{ ppm}$$

Výsledná koncentrace.

$$C_{CO} = \bar{x} \pm U = 201 \pm 5 \text{ ppm}$$

Pro vytvoření grafu normálního rozdělení je potřebné dopočítat směrodatnou odchylku  $\sigma$  a rozptyl  $\sigma^2$ . Hodnota  $\mu$  je stejná jako hodnota aritmetického průměru  $\bar{x}$ .

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{10} \cdot 30,4} = \sqrt{3,04} = 1,74$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{10} \cdot 30,4 = 3,04$$

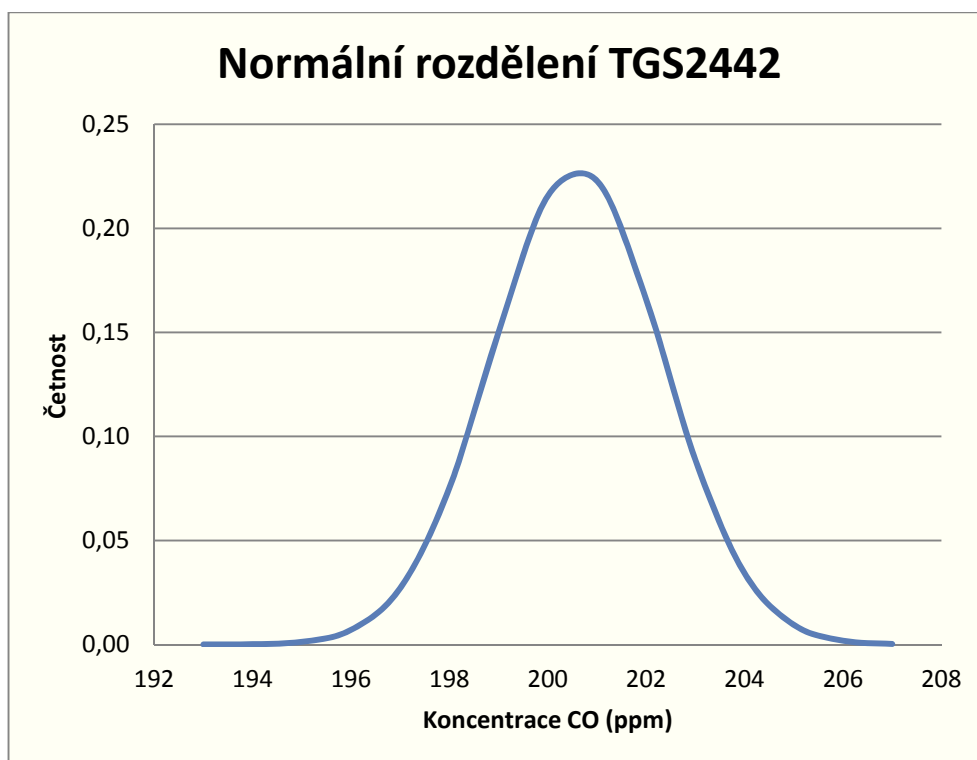
Podle následujícího vzorce se vypočítají jednotlivé body normálního rozložení. Na ukázkou je zde výpočet pro hodnotu  $x = 200$  ppm.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}} = \frac{1}{1,74 \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(200-200,6)^2}{2 \cdot 3,04}} = 0,229 \cdot e^{-0,059} = 0,216$$

Jednotlivé koeficienty jsou v tabulce 10. Na obrázku 64 je uvedený graf normálního rozložení.

Tab. 10 Tabulka koeficientů normálního rozdělení

X	f(x)
193	0
194	0
195	0,001
196	0,007
197	0,027
198	0,075
199	0,15
200	0,216
201	0,223
202	0,166
203	0,089
204	0,034
205	0,009
206	0,002
207	0



Obr. 64 Graf normálního rozdělení senzoru TGS2442

## 7.2 Nejistota měření senzoru TGS5042

Postup měření a výpočty jsou totožné jako u předchozího senzoru. Už zde nebudou uvedeny rozsáhlé výpočty, ale pouze výsledky. V níže uvedené tabulce je 10 naměřených hodnot. Rozlišení měřicího systému je do 783 ppm CO 1 ppm.

Tab. 11 Naměřené hodnoty senzoru TGS5042

i	$x_i$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	106	0,09
2	105	0,49
3	105	0,49
4	105	0,49
5	107	1,69
6	106	0,09
7	106	0,09
8	106	0,09
9	105	0,49
10	106	0,09
suma	1057	4,1

Aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 105,7 \text{ ppm}$$

Nejistota typu A.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,213 \text{ ppm}$$

Nejistota typu B.

$$u_B = \frac{\text{Nejistoty}}{\sqrt{3}} = 2,32 \text{ ppm}$$

Nejistota typu C.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 1,21 \text{ ppm}$$

Rozšířená nejistota na 95 % pokrytí.

$$U = k_r \cdot u_C = 2 \cdot 1,21 = 2,42 \doteq 3 \text{ ppm}$$

Výsledná koncentrace.

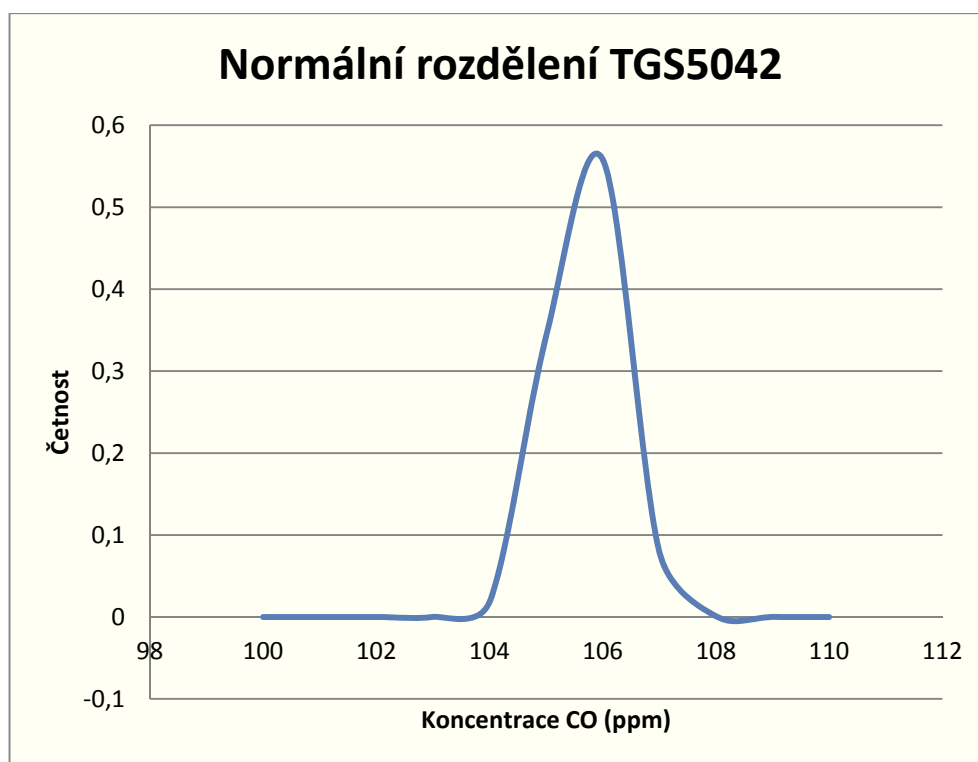
$$C_{COel} = \bar{x} \pm U = 106 \pm 3 \text{ ppm}$$

Výpočet směrodatné odchylky a rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,64$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,41$$

Graf normálního rozdělení je na obrázku 65.



Obr. 65 Graf normálního rozdělení senzoru TGS5042



### 7.3 Nejistota měření senzoru TGS4161

Postup měření a výpočty jsou totožné jako u senzoru TGS2442. Uvedeny budou pouze výsledky výpočtů. V níže uvedené tabulce je 10 naměřených hodnot. Rozlišení měřicího systému do koncentrace 0,4 obj. % je 0,01 obj. %.

Tab. 12 Naměřené hodnoty senzoru TGS4161

i	$x_i$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	0,14	0
2	0,14	0
3	0,14	0
4	0,14	0
5	0,14	0
6	0,14	0
7	0,14	0
8	0,14	0
9	0,14	0
10	0,14	0
suma	1,4	0

Aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 0,14 \text{ obj. \%}$$

Nejistota typu A.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0 \text{ obj. \%}$$

Nejistota typu B.

$$u_B = \frac{\text{Nejistoty}}{\sqrt{3}} = 0,0016 \text{ obj. \%}$$

Nejistota typu C.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,0016 \text{ obj. \%}$$

Rozšířená nejistota na 95 % pokrytí.

$$U = k_r \cdot u_C = 2 \cdot 0,0016 = 0,0032 \doteq 0,01 \text{ obj. \%}$$

Výsledná koncentrace.

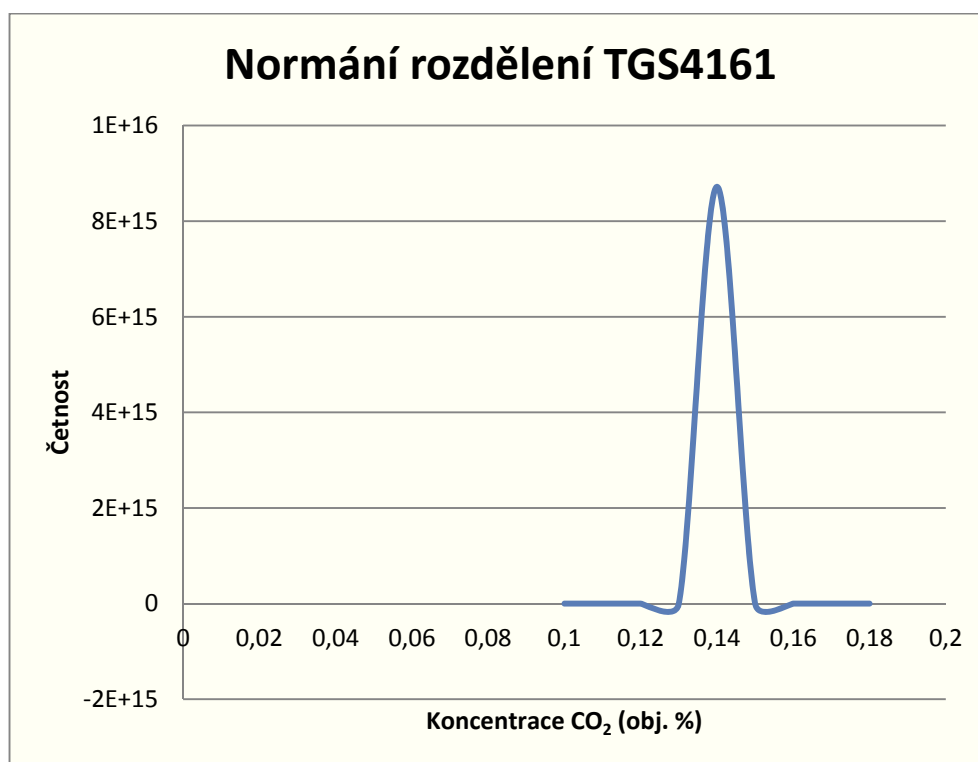
$$C_{CO_2} = \bar{x} \pm U = 0,14 \pm 0,01 \text{ obj. \%}$$

Výpočet směrodatné odchylky a rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0$$

Graf normálního rozdělení je na obrázku 66.



Obr. 66 Graf normálního rozdělení senzoru TGS4161

## 7.4 Nejistota měření senzoru TGS2611

Postup měření a výpočty jsou totožné jako u senzoru TGS2442. Uvedeny budou pouze výsledky výpočtů. V níže uvedené tabulce je 10 naměřených hodnot DMV. Rozlišení měřicího systému do 15 % DMV je 1 %.

Tab. 13 Naměřené hodnoty senzoru TGS2611

i	$x_i$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	4	0,01
2	4	0,01
3	4	0,01
4	4	0,01
5	4	0,01
6	3	0,81
7	4	0,01
8	4	0,01
9	4	0,01
10	4	0,01
suma	39	0,9

Aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = 3,9 \%$$

Nejistota typu A.

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,1 \%$$

Nejistota typu B.

$$u_B = \frac{\text{Nejistoty}}{\sqrt{3}} = 0,044 \%$$

Nejistota typu C.

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 0,11 \%$$

Rozšířená nejistota na 95 % pokrytí.

$$U = k_r \cdot u_C = 2 \cdot 0,11 = 0,22 \doteq 1 \%$$

Výsledná koncentrace.

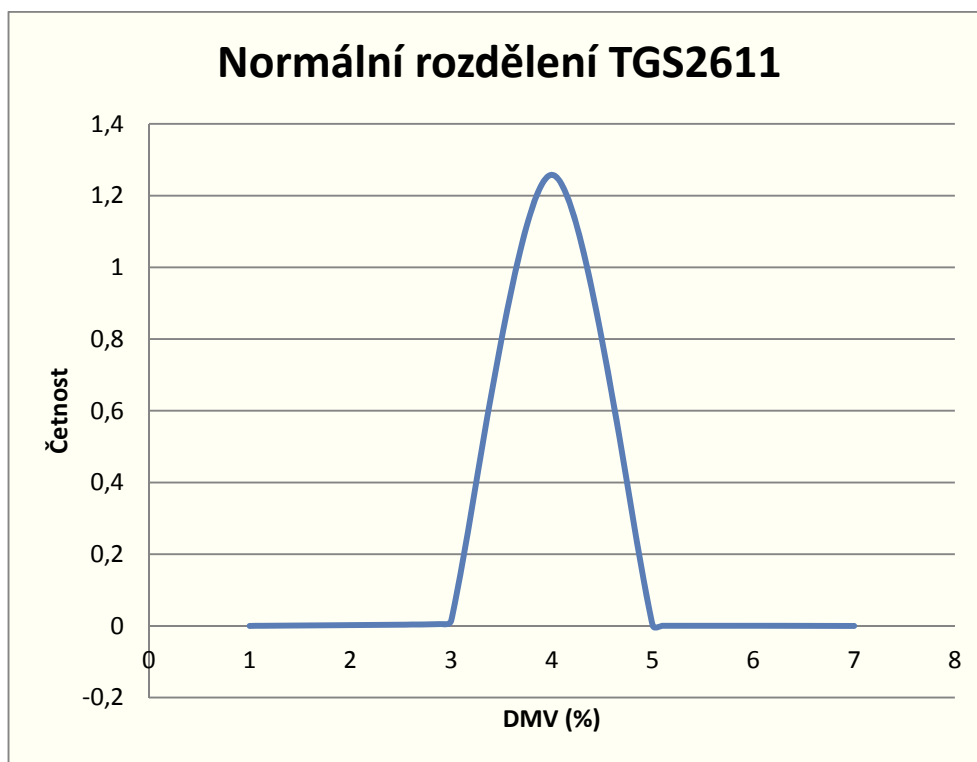
$$C_{CH_4} = \bar{x} \pm U = 4 \pm 1 \%$$

Výpočet směrodatné odchylky a rozptylu.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = 0,3$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = 0,09$$

Graf normálního rozdělení je na obrázku 67.



Obr. 67 Graf normálního rozdělení senzoru TGS2611

## Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a sestavit měřicí systém, jehož úkolem bude měřit koncentrace vybraných plynů. Jedná se o měření koncentrace oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a o měření dolní meze výbušnosti metanu. Dále tato jednotka měří teplotu pro teplotní kompenzaci senzorů.

Veškeré senzory plynů jsou vybrány od firmy Figaro USA Inc. K měření oxidu uhelnatého byly vybrány dva senzory a jedná se o žhavený polovodičový senzor TGS2442 a o elektrochemický senzor TGS5042. Použité jsou dva senzory, které pracují na odlišných principech z důvodu porovnání jejich vlastností. Pro měření oxidu uhličitého byl vybrán senzor TGS4161 a pro měření DMV byl vybrán senzor TGS2611.

Všechny senzory kromě senzoru CO<sub>2</sub> jsem teplotně kompenzoval. Kompenzace probíhala tak, že jsem podle technické dokumentace sestavil korekční křivku, kterou jsem proložil polynomem odpovídajícího řádu v Matlabu. Výsledné koeficienty jsem zanesl do řídicího programu měřicího systému, kde se následně podle změřené teploty vypočítal korekční koeficient, a podle pokynů v technické dokumentaci jsem provedl korekci. Senzor CO<sub>2</sub> není teplotně kompenzován, protože podle technické dokumentace to není nutné a navíc nebyly uvedeny hodnoty pro vytvoření korekční křivky.

Vzorce pro výpočet koncentrace byly pro senzory TGS2442 a TGS5042 uvedeny v technické dokumentaci, ale pro senzory TGS2611 a TGS4161 už ne. V dokumentaci byl sice graf závislosti odporu snímací vrstvy na koncentraci CH<sub>4</sub> u senzoru TGS2611 a vygenerované elektromotorické napětí v závislosti na koncentraci CO<sub>2</sub> u senzoru TGS4161, ale obě osy byly v logaritmických souřadnicích, a proto by nešlo přesně určit výslednou koncentraci. Tento problém vyřešili autoři pro TGS2611 ve zdroji [11] a pro TGS4161 zde [13].

Kalibraci jednotlivých senzorů jsem prováděl pomocí referenčního přístroje iBrid MX6, který umožňoval měření CO, CO<sub>2</sub> a DMV CH<sub>4</sub>, a proto byl využit u kalibrace všech použitých senzorů. Pro kalibraci senzorů CO byl využit zdroj CO jako výstup z hoření vonné tyčinky, protože nebylo k dispozici čisté CO. U senzoru TGS2442 nastal problém s postupným únikem CO z plynové komory, protože senzor se na 100% hodnotu ustaloval cca 10min. Tento problém byl vyřešen precizním utěsněním komory. Podle výsledků kalibrační křivky (Obr. 54) je tento senzor přesný pouze v těsné blízkosti bodu kalibrace. Tento jev je uveden i v technické dokumentaci [9]. Senzor TGS5042 se kalibroval softwarově, kdy se jeho přesná hodnota zesilujícího rezistoru zapsala do řídicího programu. Jedná se o velmi přesný senzor CO s velmi rychlou odezvou na změnu koncentrace. Při kalibraci senzoru TGS4161 jsem jako zdroj CO<sub>2</sub> použil okolní vzduch. U tohoto senzoru jsem bez problému provedl kalibraci. Poslední senzor TGS2611 jsem kalibroval obdobně jako předchozí senzory. Jelikož nebyl k dispozici čistý metan, použil jsem jako náhradu zemní plyn, který obsahuje přes 90 % metanu. Kalibrace tohoto senzoru také proběhla úspěšně.

Ke každému senzoru jsem vypočítal standardní nejistoty typu A, B, C a rozšířenou nejistotu pro 95% pokrytí. Dále jsem vytvořil pro každý senzor graf normálního rozdělení. Pro senzor TGS2442 tyto nejistoty platí pouze kolem bodu kalibrace a výsledná nejistota je 5 ppm. Druhý senzor CO TGS5042 má rozšířenou nejistotu rovnou 3 ppm. Třetí senzor TGS2611 má rozšířenou nejistotu rovnou 1 %. Poslední senzor TGS4161 má rozšířenou nejistotu rovnou 0,01 %.

K měřicímu systému vznikla vizualizace. Původně jsem tvořil vizualizaci v programu Reliance za použití OPC serveru pro Arduino. Tento způsob se však neodsvedčil, a proto

jsem vytvořil vizualizaci v Matlabu. Vizualizace umožňuje zobrazovat naměřená data v grafu a popřípadě je exportovat do Excelu.

Uvedený měřicí systém vznikl jako výukový model do předmětů EMP (Elektronické měření a přístroje) a MS (Měřicí systémy) na katedře kybernetiky a biomedicínského inženýrství, jednak pro měření a kalibraci senzorů a jednak v oblasti návrhu a realizace měřicích systémů. Za tímto účelem vznikl vyplněný vzorový protokol měření s návodem obsluhy modelu a vizualizace a s postupy měření. Protokol je k nahlédnutí v příloze D. K měřicímu systému vznikly celkem tři demonstrační programy. Program pro měření CO, kde jsou využity oba senzory CO. Program vznikl za účelem porovnání těchto dvou senzorů. Druhý program pro měření CO<sub>2</sub> a třetí pro měření DMV CH<sub>4</sub>.

Studenti, kteří budou využívat tento výukový model, se mohou seznámit s několika senzory plynů od firmy Figaro USA Inc. a s jejich principem činnosti. Dále se mohou seznámit s kalibrací jednotlivých senzorů pomocí referenčních přístrojů a s jejich teplotní kompenzací.

Měřicí systém je navržený na platformě Arduino, která umožňuje propojení s PC a tím se stal tento výukový model vhodnou demonstrační pomůckou pro navrhování komplexních měřicích systémů. Je možné vytvářet vlastní řídicí programy pro obsluhu až čtyř senzorů plynů, a tím si prakticky vyzkoušet vývojové prostředí ARDUINO. Další možností je seznámení se s vizualizací naměřených dat na PC, jako např. Matlab nebo jiných SCADA/HMI systémů.

Měřicí systém lze rozšířit o senzor vlhkosti, kterého by se využilo k vlhkostní kompenzaci senzorů. Tím by vzrostla ještě větší přesnost a variabilita oblasti měření. Dále lze model rozšířit o ethernetový modul na Arduino, který by umožnil ovládat měřicí systém odkudkoliv a odesílat naměřená data přímo na webovou stránku.

Závěrem lze konstatovat, že jsem splnil veškeré body zadání této diplomové práce. I přes menší problémy se mi podařilo navrhnout a sestavit funkční měřicí systém a aplikovat jej do výukového modelu.

## Použitá literatura

- [1] *VODIVOSTNÍ SENZOR PLYNŮ* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: [https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/09\\_vodivostni\\_senzory.pdf](https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/09_vodivostni_senzory.pdf)
- [2] Operating principle. *Figaro* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/mos-type.html>
- [3] *SENZORY* [online]. Praha, 2007 [cit. 2016-01-18]. ISBN 978-80-86238-20-3. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/anl/paci/PAC/prezentace/senzory.pdf>
- [4] Operating principle. *Figaro* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.figarosensor.com/technicalinfo/principle/electrochemical-type.html>
- [5] UŽ VÍTE VŠE O OTRAVĚ OXIDEM UHELNATÝM? *Tlakinfo* [online]. 2006 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2>
- [6] Energie versus čerstvý vzduch. *ASB-portál* [online]. 2010 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.asb-portal.cz/tzb/vetrani-a-klimatizace/energie-versus-cerstvy-vzduch>
- [7] Arduino UNO. *Arduino8* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.arduino8.cz/druhy-vyvojovych-desek>
- [8] *ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P* [online]. Atmel Corporation, 2015 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: [http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p\\_datasheet\\_complete.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8271-8-bit-avr-microcontroller-atmega48a-48pa-88a-88pa-168a-168pa-328-328p_datasheet_complete.pdf)
- [9] *TGS 2442* [online]. Figaro [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.datasheetarchive.com/dlmain/Datasheets-9/DSA-179986.pdf>
- [10] *TGS2611* [online]. Figaro [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: [http://www.weltronics.com/upload/product/original/201306131559\\_143758308496.pdf](http://www.weltronics.com/upload/product/original/201306131559_143758308496.pdf)
- [11] IONEL, Raul, Sabin IONEL a Aurel GONTEAN. *Virtual Instrumentation with Mobile Device control for Methane Concentration Measurements* [online]. 2012 [cit. 2016-01-18]. ISBN 978-1-61208-200-4. Dostupné z: <https://www.google.cz/url?sa=t>
- [12] *TGS4161* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <http://www.netzmafia.de/skripten/hardware/Datenblaetter/Gassensoren/TGS4161Dtl.pdf>
- [13] *Libelium* [online]. 2012 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: <https://www.libelium.com/forum/viewtopic.php?f=15>

- [14] *TGS5042* [online]. [cit. 2016-01-18]. Dostupné z:  
<http://www.figarosensor.com/products/5042Dtl.pdf>
- [15] JANÍČEK, Jan. Polovodičové snímače teploty – termistory. *Automa* [online]. **2015**(1) [cit. 2016-01-18]. Dostupné z: [http://automa.cz/index.php?id\\_document=53323](http://automa.cz/index.php?id_document=53323)
- [16] *NTC Thermistors* [online]. 2012 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z:  
<http://www.gme.cz/img/cache/doc/118/042/termistor-ntc-ntc-640-10k-datasheet-1.pdf>
- [17] Steinhart–Hart equation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2016 [cit. 2016-01-18]. Dostupné z:  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart%E2%80%93Hart\\_equation](https://en.wikipedia.org/wiki/Steinhart%E2%80%93Hart_equation)
- [18] MC21605C6WK-SPTLY. *Farnell* [online]. [cit. 2016-04-27]. Dostupné z:  
<http://cz.farnell.com/midas/mc21605c6wk-sptly/lcd-16x2-stn-black-on-y-green/dp/2218958>
- [19] Rovnoměrné a normální rozložení četnosti. *Matematika* [online]. Nová média, 2014 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.matematika.cz/rovnomerne-normalni-rozlozeni>
- [20] *Nejistoty měření a zpracování výsledků* [online]. s. 26-41 [cit. 2016-04-10]. Dostupné z:  
<https://vscht.cz/ufmt/cs/pomucky/uhrovah/docs/kapitola4.pdf>



## Seznam příloh

Příloha A	Výpočet Steinhart-Hartovy rovnice.....	I
Příloha B	Návrh schématu a DPS řídicího modulu .....	IV
Příloha C	Návrh schématu a DPS senzorového modulu .....	VI
Příloha D	Vzorový protokol měření .....	VIII
Příloha E	Experimentální měření .....	XVII
Příloha F	Elektronická příloha .....	XXII

## Příloha A Výpočet Steinhart-Hartovy rovnice

V této příloze je uveden výpočet Steinhart-Hartovy rovnice. Vzorce jsou převzaty ze zdroje [17].

Výpočet koeficientů  $L_1 - L_3$ .

$$L_1 = \ln(R_1) \tag{A.1}$$

$$L_2 = \ln(R_2) \tag{A.2}$$

$$L_3 = \ln(R_3) \tag{A.3}$$

Kde je:

$R_{1,2,3}$  – odpor termistoru ( $\Omega$ )

Další výpočet koeficientů  $Y_1$  až  $Y_3$ .

$$Y_1 = \frac{1}{T_1} \tag{A.4}$$

$$Y_2 = \frac{1}{T_2} \tag{A.5}$$

$$Y_3 = \frac{1}{T_3} \tag{A.6}$$

Kde je:

$T_{1,2,3}$  – teplota (K)

Koeficienty  $\gamma_2$  a  $\gamma_3$  se vypočítají pomocí rovnic (A.7) a (A.8), kde se dosadí předešlé výpočty.

$$\gamma_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} \tag{A.7}$$

$$\gamma_3 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} \tag{A.8}$$

Parametr C se vypočítá podle rovnice (A.9).

$$C = \left( \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{L_3 - L_2} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} \tag{A.9}$$

Parametr B se vypočítá podle rovnice (A.10).

$$B = \gamma_2 - C \cdot (L_1^2 + L_1 \cdot L_2 + L_2^2) \tag{A.10}$$

Poslední parametr A se vypočítá podle rovnice (A.11).

$$A = Y_1 - (B + L_1^2 \cdot C) \cdot L_1 \tag{A.11}$$

Výsledná teplota se vypočítá podle rovnice (A.12).

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3} \text{ (K)} \quad (\text{A.12})$$

Kde je:

T – teplota (K)

R – naměřený odpor termistoru ( $\Omega$ )

Například si zvolíme tři teploty  $T_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $T_3 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Odpor termistoru k jednotlivým teplotám jsou:  $R_1 = 32554 \text{ } \Omega$ ,  $R_2 = 3605 \text{ } \Omega$  a  $R_3 = 677,3 \text{ } \Omega$ . Naměřený odpor na termistoru je  $10 \text{ k}\Omega$ .

Vypočítáme pomocné koeficienty  $L_1$ - $L_3$ ,  $Y_1$ - $Y_3$  a  $\gamma_2$  a  $\gamma_3$ .

$$L_1 = \ln(R_1) = \ln(32554) = 10,39$$

$$L_2 = \ln(R_2) = \ln(3605) = 8,19$$

$$L_3 = \ln(R_3) = \ln(677,3) = 6,52$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0 + 273,15} = 0,003660992$$

$$Y_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{50 + 273,15} = 0,003094538$$

$$Y_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{100 + 273,15} = 0,002679887$$

$$\gamma_2 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} = \frac{0,003094538 - 0,003660992}{8,19 - 10,39} = 0,000257411$$

$$\gamma_3 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} = \frac{0,002679887 - 0,003660992}{6,52 - 10,39} = 0,000253349$$

Výpočet jednotlivých parametrů.

$$C = \left( \frac{\gamma_3 - \gamma_2}{L_3 - L_2} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} = \left( \frac{0,000253349 - 0,000257411}{6,52 - 8,19} \right) \cdot (10,39 + 8,19 + 6,52)^{-1}$$

$$C = 9,68058 \cdot 10^{-8}$$

$$B = \gamma_2 - C \cdot (L_1^2 + L_1 \cdot L_2 + L_2^2)$$

$$B = 0,000257411 - 9,68058 \cdot 10^{-8} \cdot (10,39^2 + 10,39 \cdot 8,19 + 8,19^2)$$

$$B = 0,00023223$$

$$A = Y_1 - (B + L_1^2 \cdot C) \cdot L_1 = 0,003660992 - (0,00023223 + 10,39^2 \cdot 9,68058 \cdot 10^{-8}) \cdot 10,39$$

$$A = 0,0011395$$

Výpočet teploty.

$$T = \frac{1}{A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R)^3}$$

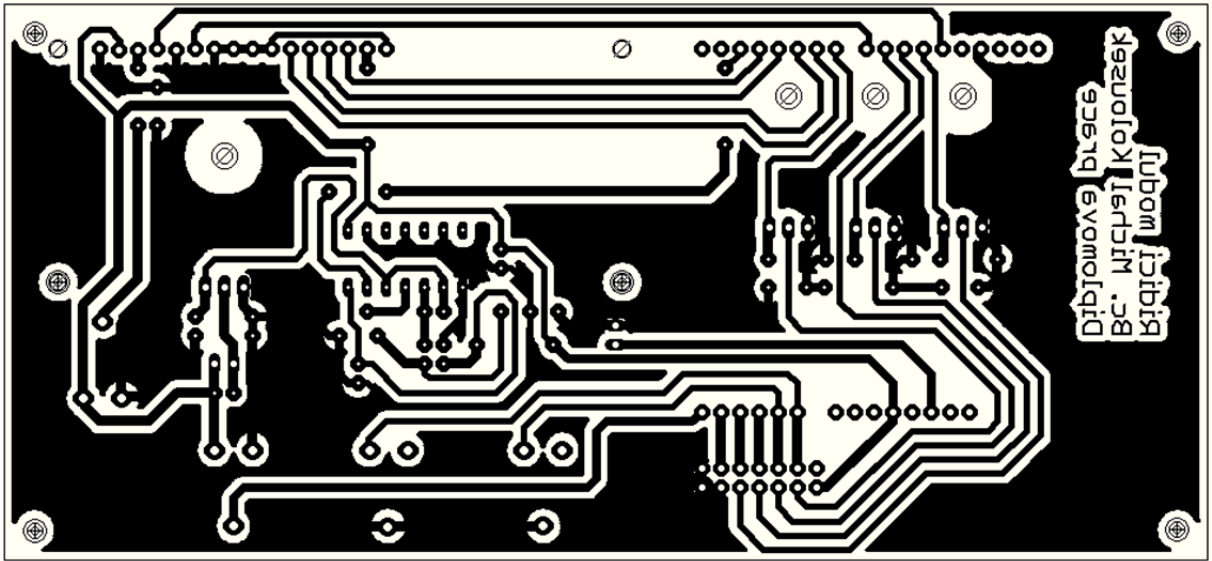
$$T = \frac{1}{0,0011395 + 0,00023223 \cdot \ln(10000) + 9,68058 \cdot 10^{-8} \cdot \ln(10000)^3} = 298,15 \text{ K}$$

Přepočet Kelvinů na Celsia.

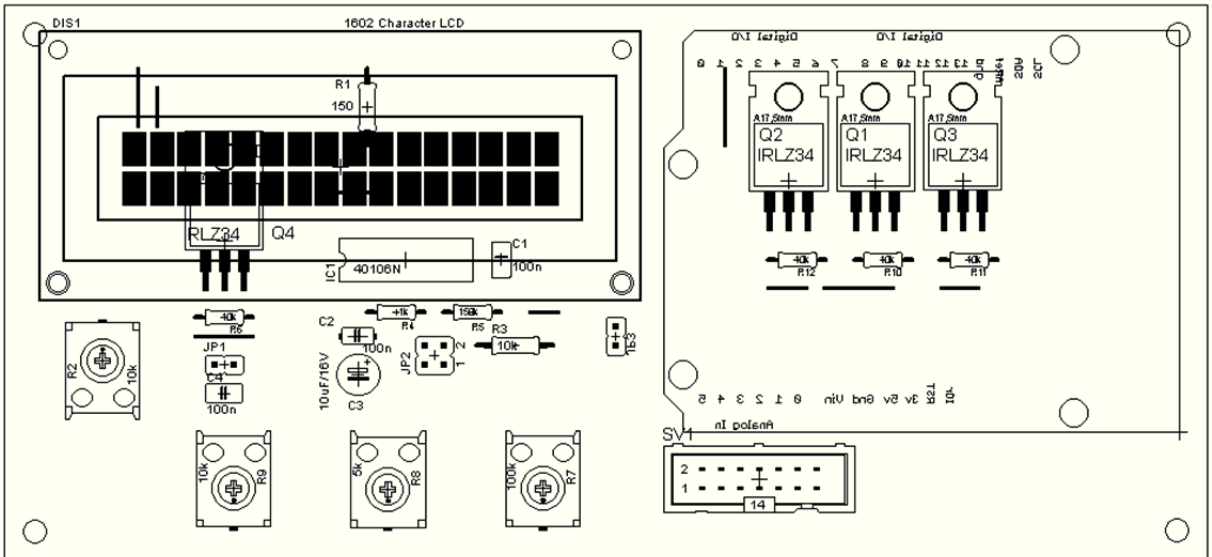
$$T_c = T - 273,15 = 298,15 - 273,15 = 25 \text{ °C}$$

Výsledek je správný, protože termistor 10K má při teplotě 25 °C odpor 10 kΩ.



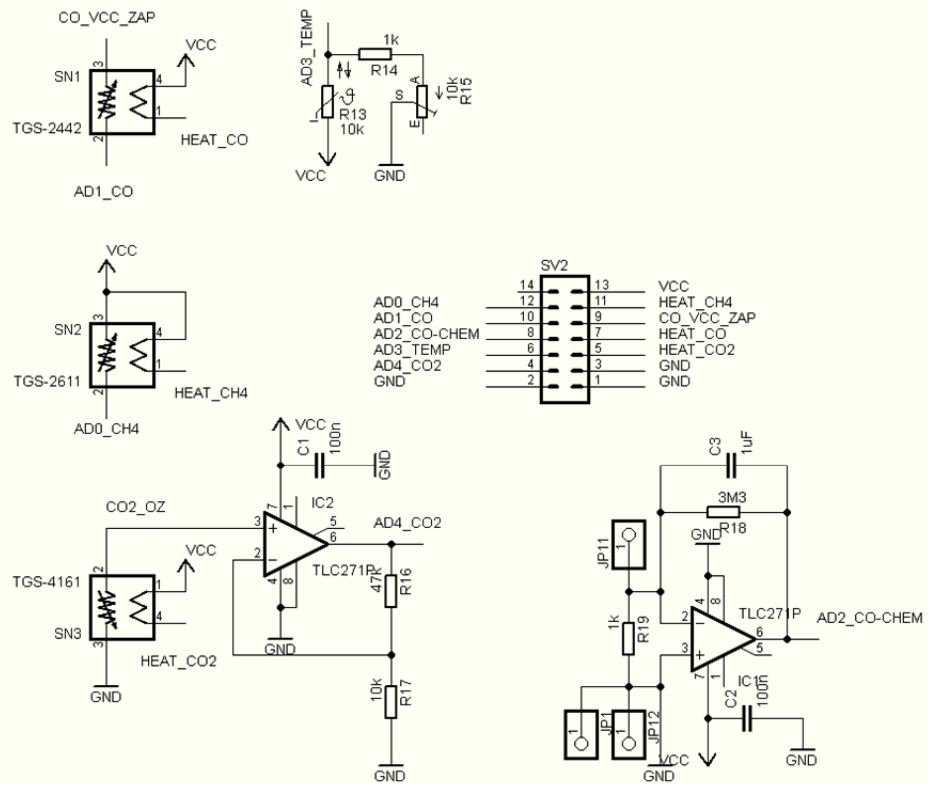


DPS řídicího modulu



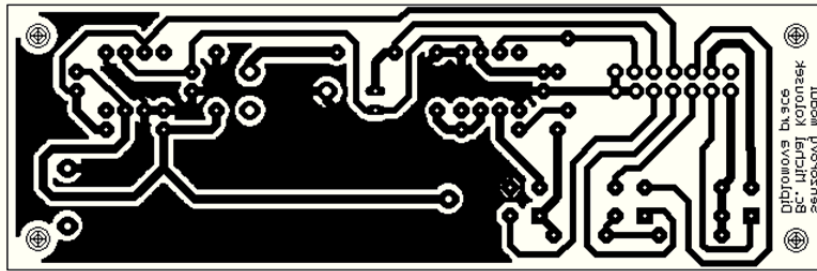
Osazovací plán řídicího modulu

# Příloha C Návrh schématu a DPS senzorového modulu

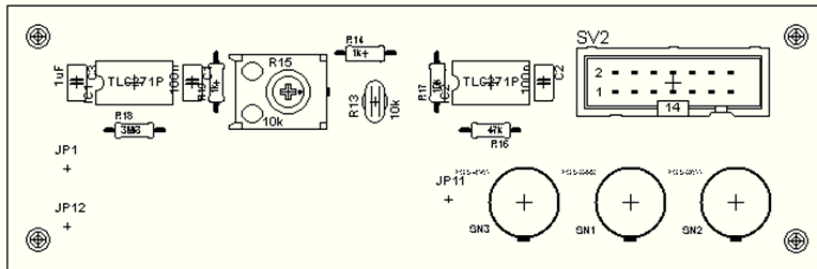


TITLE: Senzorovy modul	
Document Number:	REV:
Date: not saved!	Sheet: 1/1

Schéma senzorového modulu



DPS сенсорного модулю



Osazovací plán сенсорного модулю



## **Příloha D Vzorový protokol měření**

V příloze je vyplněný vzorový protokol měření. Jsou zde uvedeny návody pro používání výukového modelu a vizualizace.

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství



## Vzorový protokol měření

**Jméno Příjmení, Login**

**Datum**

## Zadání

1. Seznamte se s principem funkce žhavených polovodičových a elektrochemických senzorů plynů.
2. Vytvořte kalibrační křivku senzoru TGS2442 pro kalibrační bod 100 ppm a 200 ppm CO. Jako referenční přístroj pro kalibraci použijte senzor TGS5042.
3. Vytvořte kalibrační křivku senzoru TGS4161. Pro kalibraci senzoru použijte referenční přístroj iBrid MX6
4. Vytvořte kalibrační křivku senzoru TGS2611. Senzor nakalibrujte na rozsah 10 % DMV. Ke kalibraci využijte tabulku hodnot odporů v technické dokumentaci.
5. Naměřené hodnoty vyjádřete graficky.
6. Dosažené výsledky zhodnoťte do závěru.

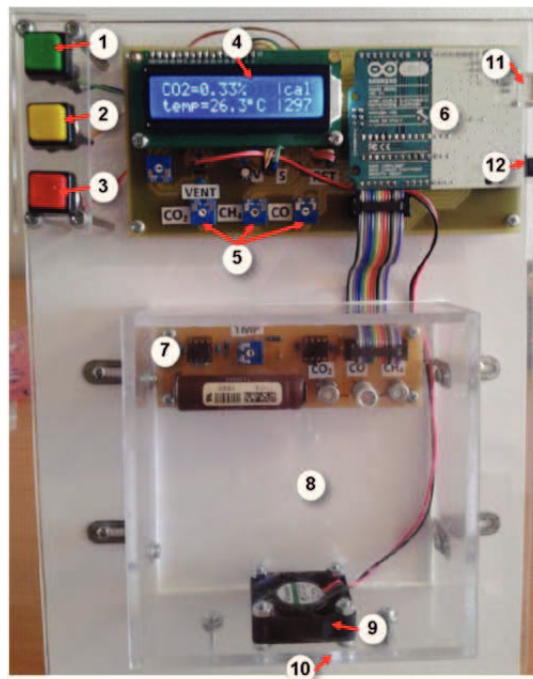
## Návod k obsluze

### Výukový model

Výukový měřicí systém je založený na platformě Arduino UNO (6), který je připojen do PC přes USB kabel (11). Přes USB port se tato platforma programuje a využívá se k přenosu dat do PC (vizualizace). Model je napájený 7,5V adaptérem (12). Na LCD displeji (4) se zobrazují aktuální naměřená data. Měřicí systém je ovládaný třemi tlačítky: zeleným (1) pro spuštění/stopnutí měření; žlutým (2) pro zapnutí/vypnutí ventilátoru; červeným (3) pro reset měřicího systému.

Kalibrační trimery (5) slouží ke kalibraci plynových senzorů (TGS2442, TGS2611, TGS4161).

Plynová komora (8) má ze spodní strany umístěný ventilátor (9), přes který se vhání měřené plyny do plynové komory.



Výukový měřicí systém

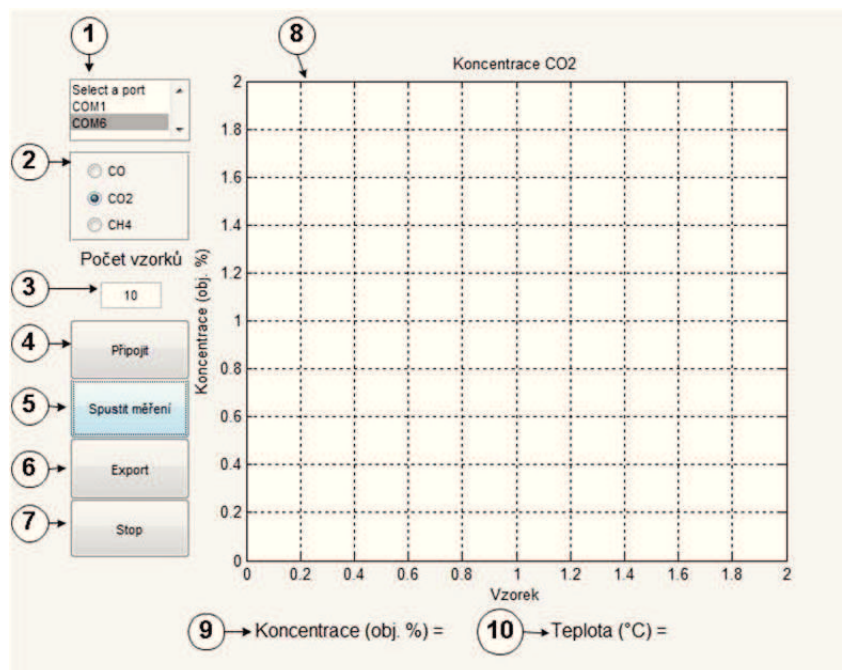
- tlačítko start/stop (1)
- tlačítko ventilátoru start/stop (2)
- tlačítko reset (3)
- LCD displej pro zobrazení aktuálních naměřených hodnot (4)
- kalibrační trimery (5)
- Arduino UNO (6)
- senzorový modul (7)
- plynová komora (8)
- ventilátor (9)
- průduch do plynové komory (10)
- USB port pro připojení do PC (programování, vizualizace) (11)
- napájecí port (12)

## Vizualizace

Vizualizace se spouští skriptem Vizualizace.m v Matlabu. Po spuštění hlavní obrazovky už lze s vizualizací pracovat. Ve výběru dostupných COM portů (1) se vybere COM port, ke kterému je měřicí systém (Arduino) připojen. Zvolí se plyn (2), který se bude měřit a zadá se počet vzorků (3), které chceme odebrat. Pokud je vše zadané správně, lze se tlačítkem (4) připojit k měřicímu systému.

Měření se spouští tlačítkem *Spustit měření* (5) a po stisknutí zeleného tlačítka start/stop na panelu se spustí měření. Tlačítkem *Export* (6) se dosavadní data uloží do Excelu. Posledním tlačítkem *Stop* (7) se zastaví měření a vizualizace se odpojí od měřicího systému.

Když je vizualizace připojená k měřicímu systému, nelze řídicí jednotku naprogramovat z důvodu obsazení COM portu vizualizací. Nejprve je nutné vizualizaci odpojit tlačítkem *Stop* (7).



Vizualizační okno

- volba COM portu, ze kterého vizualizace bude přijímat data (1)
- volba měřeného plynu (2)
- nastavení počtu vzorků, které se odeberou (3)
- připojení se ke zvolenému COM portu (4)
- spuštění měření (5)
- export naměřených dat do Excelu (6)
- ukončení měření a odpojení od COM portu (7)
- grafické vyjádření naměřené koncentrace plynů jednotlivých vzorků (8)
- zobrazená aktuální koncentrace plynů (9)
- zobrazení aktuální teploty ovzduší (10)

## Postupy měření

### Postup měření CO

- a. Před samotným měřením otevřete průduch plynové komory a sepněte ventilátor. Spusťte měření a nechte senzory ustálit 10 minut.
- b. Vypněte ventilátor a umístěte pod něj zapálenou vonnou tyčinku. Nechte chvíli stoupat kouř do plynové komory a uzavřete průduch. Sepněte ventilátor přibližně na 5 s pro rovnoměrné promíchání.
- c. Podle senzoru TGS5042 zkontrolujte, zda v komoře je přibližně 100 ppm CO. Pokud je ho málo, průduchem přidejte trochu kouře a sepněte ventilátor na 5 s. Pokud je ho moc, otevřete průduch se zapnutým ventilátorem a vypusťte trochu kouře.
- d. Jakmile senzor TGS5042 detekuje cca 100 ppm CO, nechte ustálit hodnotu senzoru TGS2442. Po ustálení zkorigujte hodnotu kalibračním trimerem R7.
- e. Proved'te 10 měření od cca 200 ppm do 0 ppm a hodnoty zapisujte do tabulky.
- f. Vytvořte graf kalibrační křivky.
- g. Stejnou kalibraci proved'te pro kalibrační bod 200 ppm.
- h. Proved'te 10 měření od cca 300 ppm do 0 ppm a hodnoty zapisujte do tabulky.
- i. Vytvořte graf kalibrační křivky.

### Postup měření CO<sub>2</sub>

- a. Otevřete průduch plynové komory a sepněte ventilátor, aby koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti a v plynové komoře byla stejná. Spusťte měření a nechte senzor ustálit 10 minut.
- b. Zapněte kalibrační přístroj iBrid MX6 (nechte hodnotu CO<sub>2</sub> ustálit) a zkorigujte hodnoty kalibračním trimerem R9.
- c. Vydechněte do průduchu plynové komory a zadělejte průduch.
- d. Podle potřeby promíchejte obsah plynové komory ventilátorem.
- e. Změřte 10 měření a hodnoty zapište do tabulky.
- f. Vytvořte graf kalibrační křivky.

### Postup měření DMV CH<sub>4</sub>

- Před samotným měřením otevřete průduch plynové komory a sepněte ventilátor. Spusťte měření a nechte senzor ustálit 10 minut.
- Zjistěte ID senzoru a podle toho nastavte hodnotu odporu na kalibračním trimru R8 podle tabulky v technické dokumentaci pro 10 % rozsah DMV (LEL).
- Aplikujte trochu metanu do plynové komory a zavřete průduch.
- Podle potřeby promíchejte obsah plynové komory ventilátorem.
- Proveďte 10 měření (cca od 15 % do 0 % DMV) a zapište je do tabulky.
- Vytvořte graf kalibrační křivky.

### Použité přístroje

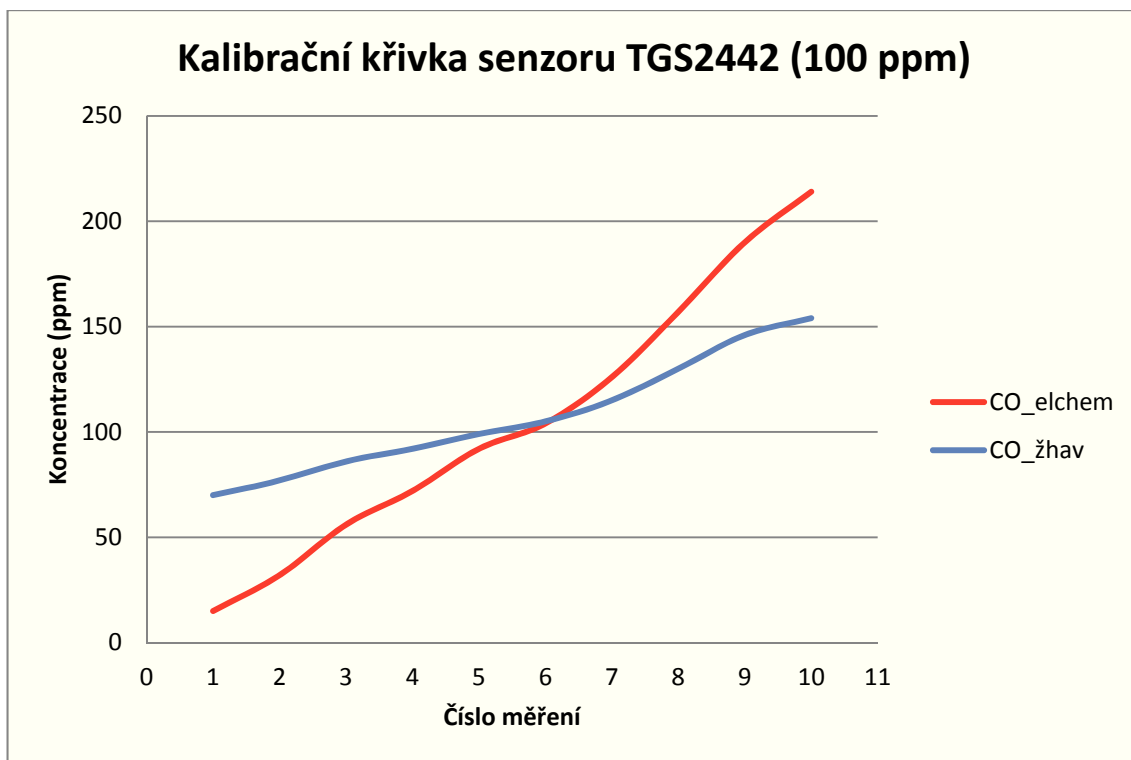
Laboratorní model pro měření plynů  
Referenční měřicí přístroj iBrid MX6  
Multimetr

### Průběh měření

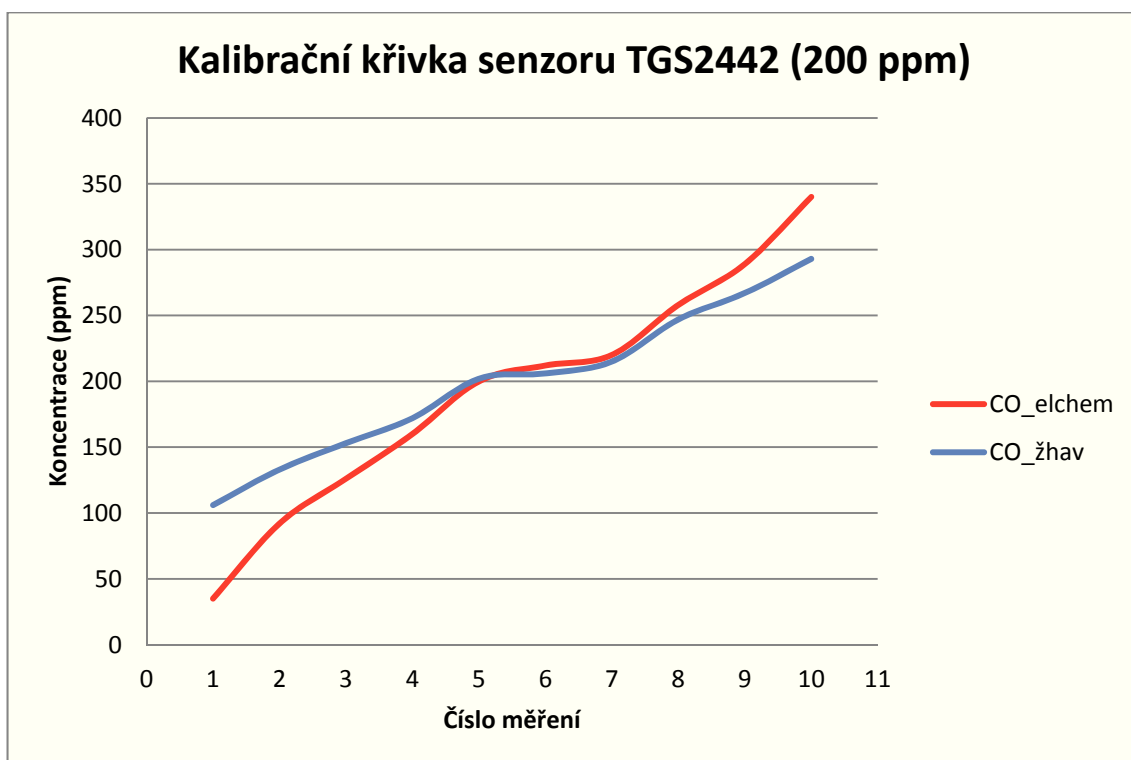
#### Průběh měření CO

Naměřené hodnoty CO

n	Kalibrace při 100 ppm		Kalibrace při 200 ppm	
	TGS2442 (ppm)	TGS5042 (ppm)	TGS2442 (ppm)	TGS5042 (ppm)
1	70	15	106	35
2	77	32	133	92
3	86	56	153	126
4	92	72	172	160
5	99	92	202	200
6	105	104	206	212
7	115	126	215	220
8	130	157	247	258
9	146	190	267	289
10	154	214	293	340



Graf kalibrační křivky TGS2442 (100 ppm)

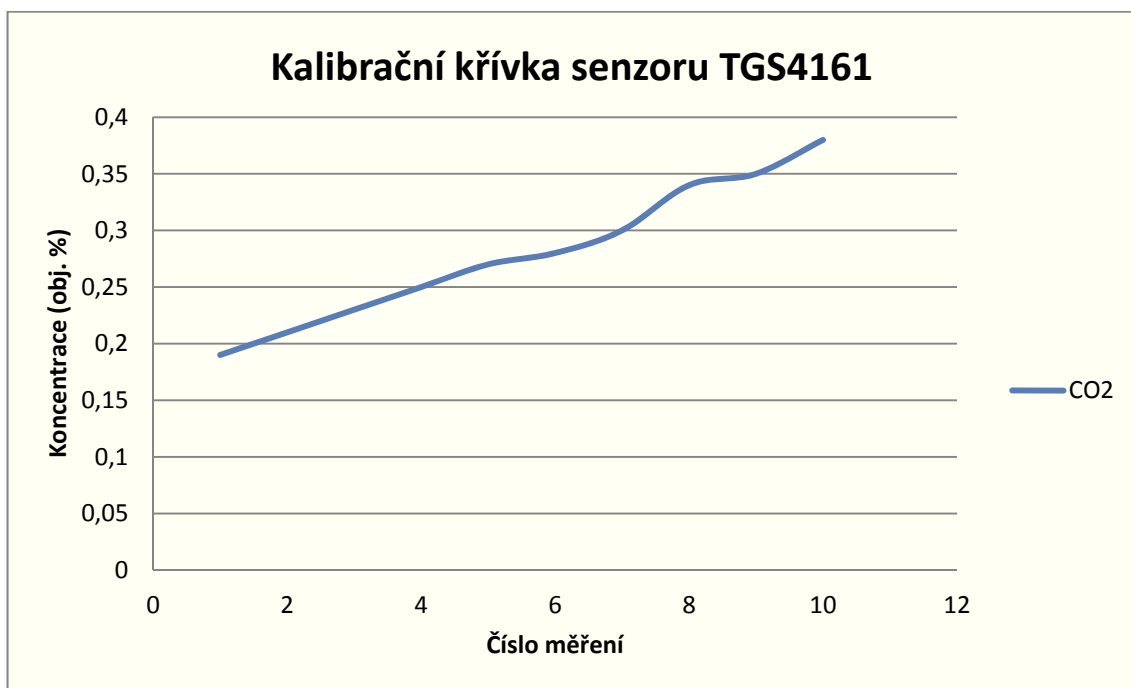


Graf kalibrační křivky TGS2442 (200 ppm)

## Průběh měření CO<sub>2</sub>

Naměřené hodnoty CO<sub>2</sub>

n	CO <sub>2</sub> (obj. %)
1	0,19
2	0,21
3	0,23
4	0,25
5	0,27
6	0,28
7	0,3
8	0,34
9	0,35
10	0,38



Graf kalibrační křivky TGS4161



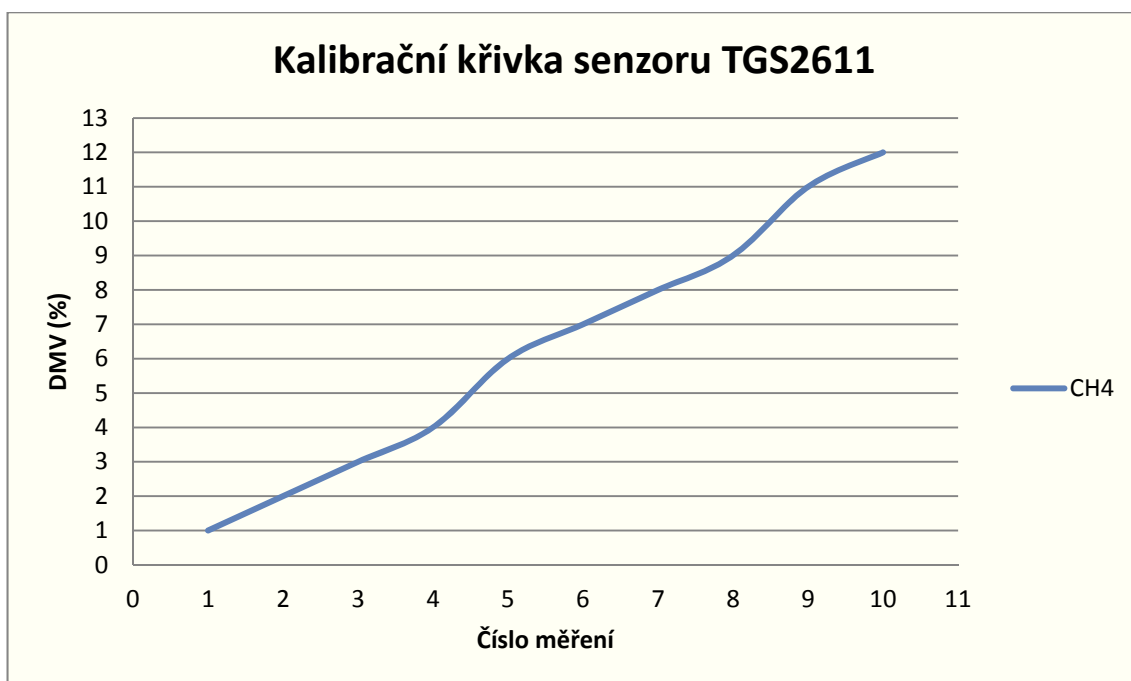
## Průběh měření DMV CH<sub>4</sub>

ID senzoru

ID senzoru	14
Odpor pro rozsah 10 % DMV (kΩ)	2,49

Naměřené hodnoty DMV metanu

n	DMV (%)
1	1
2	2
3	3
4	4
5	6
6	7
7	8
8	9
9	11
10	12



Graf kalibrační křivky TGS2611

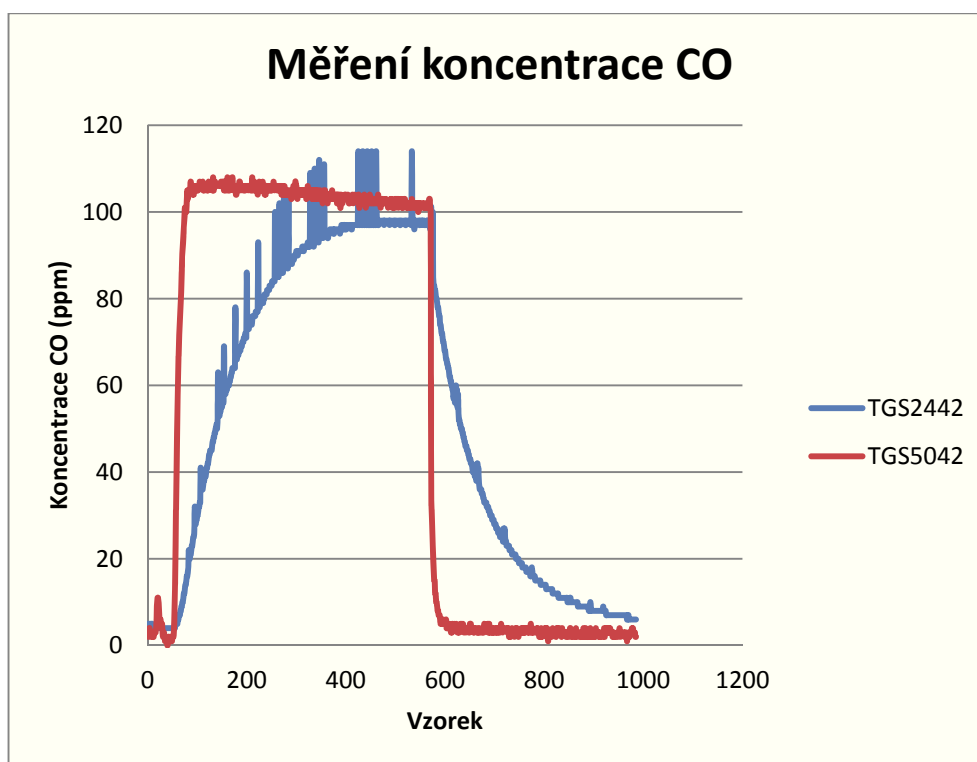
## Závěr

## Příloha E Experimentální měření

V této příloze jsou uvedeny experimentální měření z oblasti CO, CO<sub>2</sub> a DMV metanu. Kompletní naměřená data jsou v elektronické příloze F.

### Experiment č. 1 – Měření koncentrace CO

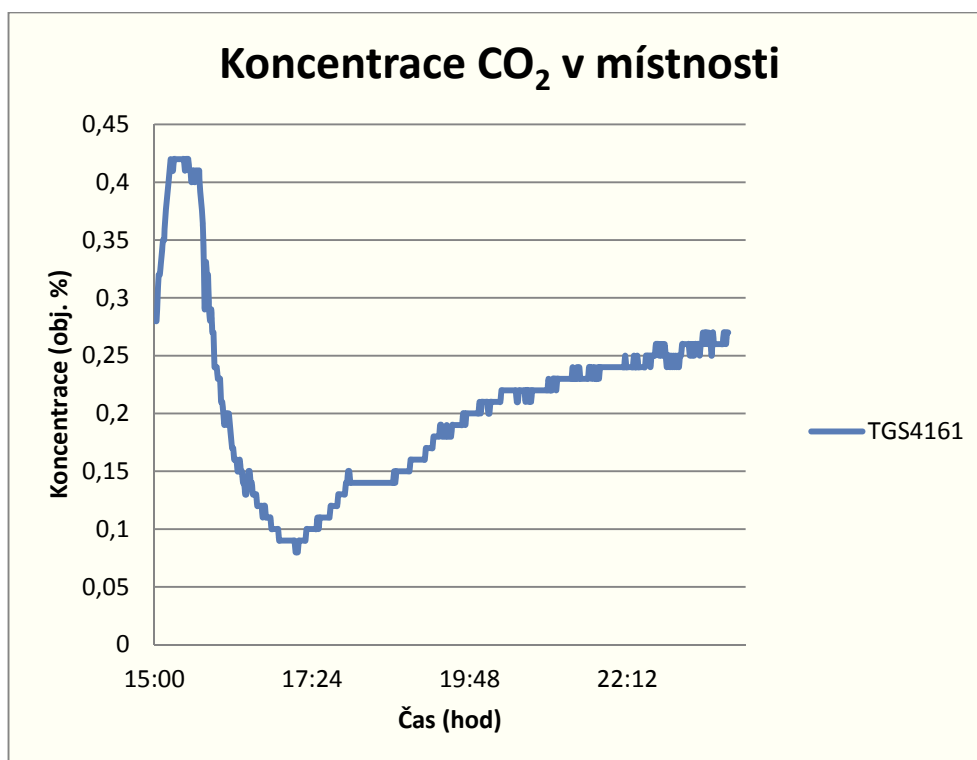
V tomto experimentu se měřila koncentrace CO v plynové komoře FIGARO SR3. Žhavený polovodičový senzor TGS2442 je kalibrován na hodnotě 100 ppm CO a má v grafu modrý průběh. Elektrochemický senzor TGS5042 má v grafu červený průběh. Do komory se vpustilo malé množství CO ze zapálené vonné tyčinky. Z průběhů na grafu lze vyzorovat, že elektrochemický senzor má velmi rychlou odezvu na změnu koncentrace CO. Své maximální hodnoty dosáhne za pár vteřin. Polovodičovému senzoru trvá cca 10 minut (1 vzorek = 1 vteřina), než se ustálí. Po ustálení byly senzory z plynové komory vyjmuty. Elektrochemický senzor zareagoval ihned. Polovodičový senzor se ustaloval na cca nulovou hodnotu zhruba další 4 minuty.



Naměřená koncentrace CO

## Experiment č. 2 – Měření koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

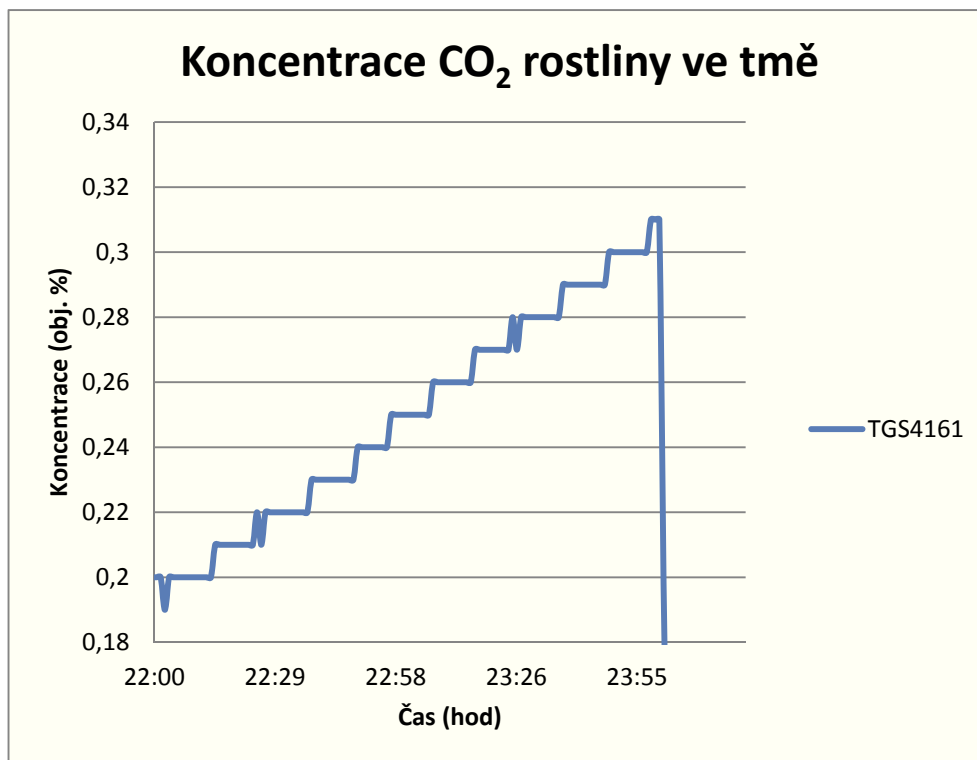
V tomto měření byl senzor CO<sub>2</sub> TGS4161 umístěn v obývané místnosti. Místnost nebyla nějakou dobu větrána a koncentrace CO<sub>2</sub> byla poměrně vysoká (záměrně). Měření začalo v 15:00 a každou minutu se odebral jeden vzorek koncentrace CO<sub>2</sub>. V čase 15:40 bylo otevřeno okno, aby se místnost vyvětrala. Na grafu lze pozorovat prudký propad koncentrace CO<sub>2</sub>. Okno se zavřelo v 17:10. Rozdíl v koncentraci CO<sub>2</sub> mezi otevřeným oknem a zavřeným oknem byl 0,33 obj. %. Po uzavření okna lze vidět mírné stoupání koncentrace CO<sub>2</sub>. Cca v čase 17:50-18:40 nebyl nikdo v místnosti. Tuto událost lze vidět na grafu reprezentovanou rovnou linkou, kdy koncentrace neklesala a ani nestoupala. Poté jsem byl v místnosti přítomen a koncentrace CO<sub>2</sub> pomalu rostla. Měření bylo ukončeno v čase 23:44.



Naměřená koncentrace CO<sub>2</sub> v místnosti

### Experiment č. 3 – Měření koncentrace CO<sub>2</sub> rostliny umístěné ve tmě

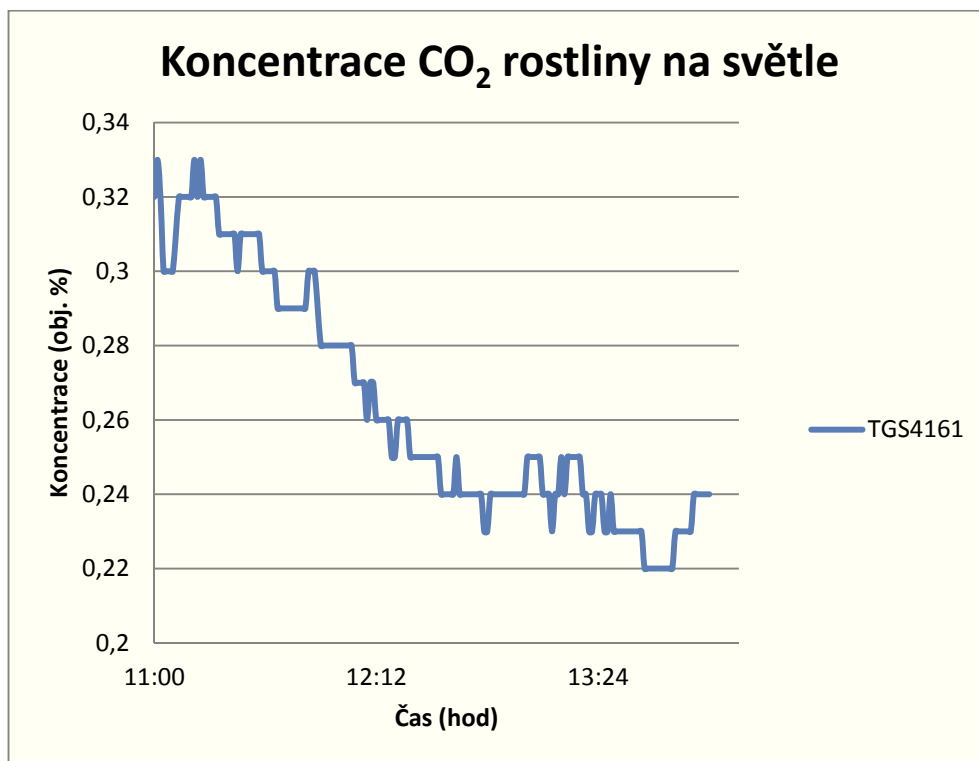
V tomto experimentu se měřilo, zda rostlina v uzavřené nádobě ve tmě dokáže znatelně produkovat CO<sub>2</sub>. Měření začalo v 22:00 a skončilo v cca 0:20. Za tuto dobu rostlina zvedla koncentraci CO<sub>2</sub> v nádobě z 0,2 na 0,31 obj. %. Po skončení experimentu byl senzor vyjmut z nádoby do okolního prostředí (na grafu lze vidět propad).



Naměřená koncentrace CO<sub>2</sub> rostliny ve tmě

#### Experiment č. 4 - Měření koncentrace CO<sub>2</sub> rostliny umístěné na světle

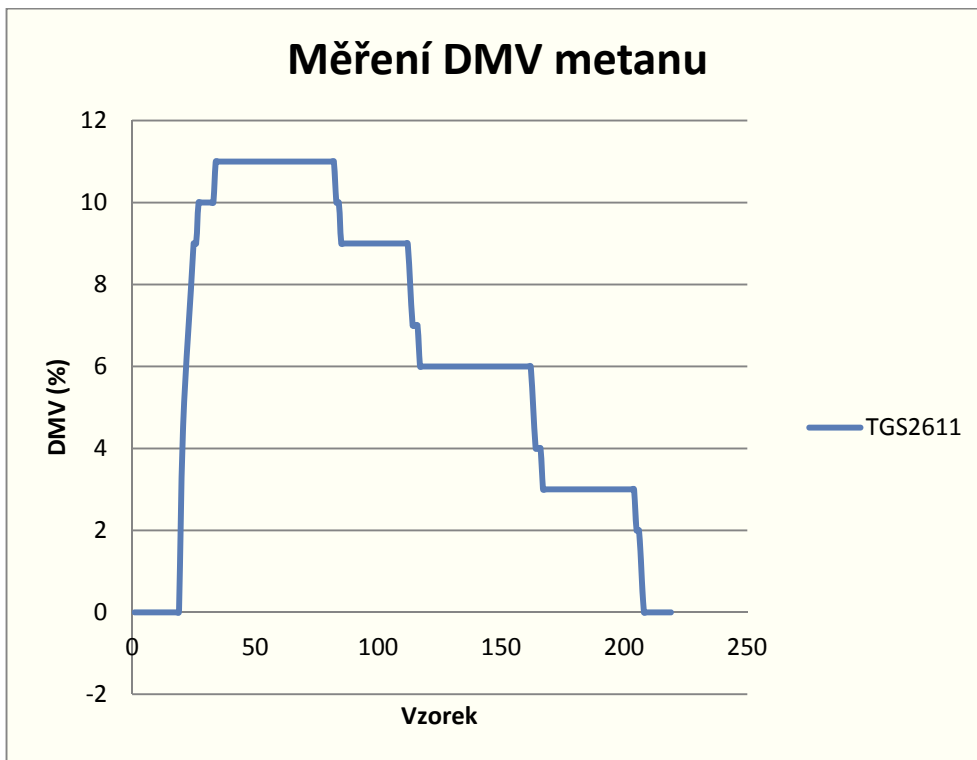
Tento experiment probíhal obdobně jako experiment č. 3, ale rostlina byla umístěna na denním světle a měřila se konzumace CO<sub>2</sub> v nádobě. Měření začalo v 11:00 a skončilo v 14:00. Za tři hodiny klesla úroveň CO<sub>2</sub> v nádobě cca o 0,1 obj. %.



Naměřená koncentrace CO<sub>2</sub> rostliny na světle

### Experiment č. 5 – Měření dolní meze výbušnosti metanu

V tomto měření se měřila DMV metanu v plynové komoře FIGARO SR3. Čistý metan nebyl k dispozici, a proto byl nahrazen zemním plynem, který obsahuje přes 90 % metanu. Do plynové komory byl vpuštěn zemní plyn. Senzor se ustálil na maximální hodnotě cca za 15 vteřin. Poté byl zemní plyn několikrát upouštěn z plynové komory a nakonec se senzor vytáhl na čistý vzduch. Z grafu lze vidět, že senzor reaguje na změny koncentrace plynu velmi rychle.



Naměřená DMV metanu

## **Příloha F Elektronická příloha**

Příloha na DVD obsahuje:

- Diplomová práce
- Vzorový protokol měření
- Hardware
  - Návrhy schémat a DPS v programu Eagle 6.4.0
  - Seznam součástek
  - Technická dokumentace
- Software
  - Zdrojové kódy ve vývojovém prostředí ARDUINO
  - Vizualizace v programu Matlab
- Měření
  - Naměřená data CO
  - Naměřená data CO<sub>2</sub>
  - Naměřená data CH<sub>4</sub>
  - Kalibrační křivky senzorů
  - Výpočet nejistot
- Konstrukce
  - Technické výkresy plynové komory v programu SolidWorks 2009