



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV INTELIGENTNÍCH SYSTÉMŮ

DEPARTMENT OF INTELLIGENT SYSTEMS

**INTELIGENTNÍ SYSTÉM PRO DETEKCI NEŽÁDOUCÍCH
PLYNŮ A KOUŘE V INTERIÉRU**

INTELLIGENT SYSTEM FOR DETECTION OF UNDESIRABLE GASES AND SMOKE IN
THE INTERIOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDREJ KURÁK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ GOLDMANN

BRNO 2018

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav inteligentních systémů

Akademický rok 2017/2018

Zadání bakalářské práce

Řešitel: **Kurák Ondrej**

Obor: Informační technologie

Téma: **Inteligentní systém pro detekci nežádoucích plynů a kouře v interiéru**
Intelligent System for Detection of Undesirable Gases and Smoke in the Interior

Kategorie: Vestavěné systémy

Pokyny:

1. Nastudujte, jaké plyny mohou vznikat při hoření běžně se vyskytujících látek. Dále se zaměřte na problematiku detekce zemního plynu.
2. Vyberte vhodné senzory pro detekci těchto plynů a sumarizujte jejich klíčové vlastnosti.
3. Navrhněte IoT zařízení s mikrokontrolérem pro zpracování dat z vybraných senzorů. Zařízení bude připojené k serveru, na kterém poběží webová aplikace pro vizualizaci výsledků.
4. Realizujte zařízení pro detekci nežádoucích plynů a kouře v interiéru. Dále pak implementujte serverovou část systému.
5. Ověřte funkčnost řešení a proveďte experimenty zaměřené na schopnost detekce vybraných plynů. Na základě technické dokumentace k jednotlivým senzorům určete nežádoucí interference s jinými plyny.

Literatura:

- FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer Science & Business Media, 2004.
- SOMOV, Andrey, et al. Combustible gases and early fire detection: an autonomous system for wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking*. ACM, 2010. p. 85-93.

Pro udělení zápočtu za první semestr je požadováno:

- Body 1 a 2.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování bakalářské práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva bakalářské práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap (20 až 30% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Goldmann Tomáš, Ing., UITS FIT VUT**

Datum zadání: 1. listopadu 2017

Datum odevzdání: 16. května 2018

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav inteligentních systémů
612 66 Brno, Božetěchova 2

doc. Dr. Ing. Petr Hanáček
vedoucí ústavu

Abstrakt

Cielom tejto práce je vytvoriť zariadenie na detekciu dymu a nebezpečných plynov vznikajúcich pri požiari. Pre riešenie zvoleného problému je navrhnuté zariadenie, ktoré dokáže tieto nebezpečné látky detekovať skôr ako dôjde k ujme na zdraví alebo poškodeniu majetku. Vytvorené riešenie poskytuje možnosť detekcie dymu, merania koncentrácie jednotlivých plynov a zaslania týchto hodnôt v reálnom čase pomocou bezdrôtového pripojenia.

Abstract

The object of this work is to create a device capable of detecting smoke and hazardous gases produced by a fire. To solve the problem is designed the device that can detect these dangerous substances before an injury or property damage. The provided solution provides smoke detection, measuring the concentration of various gases and sending these values over a wireless connection in real time.

Klíčové slová

detekcia dymu, detekcia oxidu uhľnatého, detekcia zemného plynu, požiar, IOT, ESP32, MQTT

Keywords

smoke detection, carbon monoxide detection, natural gass detection, fire, IOT, ESP32, MQTT

Citácia

KURÁK, Ondrej. *Inteligentní systém pro detekci nežádoucích plynů a kouře v interiéru*. Brno, 2018. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Tomáš Goldmann

Inteligentní systém pro detekci nežádoucích plynů a kouře v interiéru

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána Ing. Tomáša Goldmanna. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

.....
Ondrej Kurák
15. mája 2018

Podakovanie

Rád by som poďakoval svojmu vedúcemu Ing. Tomášovi Goldmannovi za odborné vedenie práce, prof. Ing. Tomášovi Svěrákovi CSc. a Ing. Ondřejovi Křištofovi za pomoc pri realizácii experimentov.

Obsah

1	Úvod	3
2	Detekcia dymu, plynov vznikajúcich pri požiari a zemného plynu	4
2.1	Vývoj požiaru v interiéri	4
2.2	Plyny vznikajúce pri požiari	5
2.3	Zemný plyn	9
2.4	Technológie na detekciu dymu	10
2.5	Technológie na detekciu plynov	11
2.6	Zhrnutie	15
3	Návrh systému	16
3.1	Senzory	16
3.2	Mikrokontrolér ESP32	19
3.3	Konektorový shield	20
3.4	Protokol MQTT	21
3.5	Server	22
3.6	Zhrnutie	23
4	Implementácia systému	24
4.1	Jednotka na získavanie dát	24
4.2	Server	27
4.3	MQTT komunikácia	29
4.4	Zhrnutie	29
5	Experimenty	30
5.1	Detekcia dymu	30
5.2	Falošná detekcia	31
5.3	Detekcia oxidu uhoľnatého	32
5.4	Detekcia zemného plynu	36
5.5	Zhrnutie	37
6	Záver	38
	Literatúra	39
	Prílohy	41
	Zoznam príloh	42
A	Obrázky	43

A.1	Konektorový shield	43
A.2	Fotoelektrický senzor dymu	45
A.3	MQ-2 charakteristiky a odvodené krivky	45
A.4	MQ-6 charakteristiky a odvodené krivky	48
A.5	MQ-9 charakteristiky a odvodené krivky	50
A.6	Vývojový diagram pre serverovú aplikáciu	52

Kapitola 1

Úvod

Včasná detekcia dymu patrí k najpodstatnejším častiam protipožiarnej ochrany. Aktuálne najpoužívané detektory dymu a nebezpečných plynov dokážu merať iba jednu z týchto veličín a neobsahujú možnosť bezdrôtového upozornenia na vzniknuté nebezpečenstvo. Existujúce riešenia, ktoré tieto vymoženosti ponúkajú, sa pohybujú v cenovej relácii niekoľko tisíc českých korún. Cieľom tejto práce je navrhnúť zariadenie na detekciu dymu, zemného plynu a nebezpečných plynov, ktoré môžu vzniknúť pri požiari v interiéri. Toto zariadenie musí byť schopné bezdrôtovo upozorniť na vznikajúce nebezpečenstvo a monitorovať hladinu jednotlivých nebezpečných plynov. Následne k nemu pripraviť aplikáciu na vizualizovanie posielaných dát.

Práca v prvej kapitole obsahuje popis jednotlivých fáz požiaru a prehľad druhov plynov vznikajúcich pri požiari s ich účinkami na ľudský organizmus. Ďalej sa zaoberá zemným plynom a jeho jednotlivými zložkami. Následne sú v nej uvedené jednotlivé technológie na detekciu dymu a plynov, ich výhody a nevýhody.

Druhá kapitola sa zaoberá návrhom zariadenia a jednotlivých senzorov na detekciu dymu, nebezpečných plynov vznikajúcich pri požiari a zemného plynu. Ďalej je v nej navrhnutá serverová aplikácia na ukladanie a vizualizáciu dát a vybraný vhodný komunikačný protokol.

V tretej kapitole je obsiahnutá implementačná časť riešenia. Detailne sú v nej opísané jednotlivé komponenty systému: jednotka na získavanie dát, serverová aplikácia a komunikačné schéma.

Na záver sú v práci uvedené experimenty, ktoré boli vykonané na potvrdenie funkčnosti zariadenia.

Kapitola 2

Detekcia dymu, plynov vznikajúcich pri požiari a zemného plynu

V tejto kapitole sú uvedené druhy plynov vznikajúcich pri požiari a ich účinky na ľudský organizmus. Ďalej sa zaoberá zemným plynom a jeho jednotlivými zložkami. Následne sú opísané jednotlivé technológie na detekciu dymu a plynov, ich výhody a nevýhody.

2.1 Vývoj požiaru v interiéri

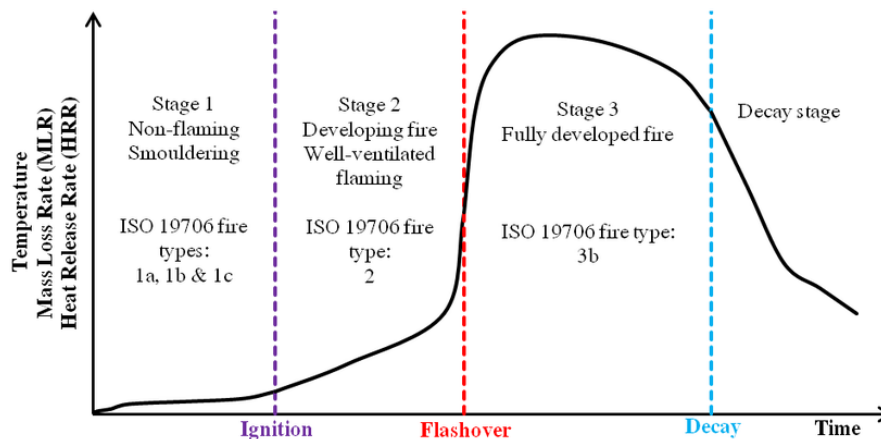
Pre správne pochopenie problematiky detekcie dymu a nežiaducich plynov vznikajúcich pri požiari je v prvom rade potrebné vedieť ako sa požiar správa v jednotlivých štádiách jeho vývoja. Vývoj požiaru v interiéri sa rozdeľuje do štyroch fáz (Obr. 2.1).

Fáza rozkladu bez ohňa je počiatkovou fázou. Ide o štádium od vzniku požiaru až po vznietenie (angl. *ignition*). V tejto fáze ešte nie je prítomný samotný oheň a dym sa preto skladá hlavne z relatívne veľkých častíc. Akonáhle je už prítomný oheň, dym sa skladá hlavne z relatívne malých častíc.

Fáza rozvíjajúceho sa požiaru je štádium od vznietenia až po zachvátenie všetkých horľavých materiálov požiarom, takzvané objemové vzplanutie (angl. *flash-over*). V tomto štádiu oheň nie je ovplyvnený tým, že je v uzavretom prostredí, preto sa dá hovoriť o ohni kontrolovanom palivom (angl. *fuel-controlled fire*) [2].

Fáza rozvinutého požiaru je štádium od objemového vzplanutia po bod, kedy sa začne znižovať intenzita horenia (angl. *decay point*). V tomto štádiu dosahuje požiar svoj vrchol a produkuje najväčšie množstvo tepla. Oheň je ovplyvnený hlavne nedostatkom kyslíka v interiéri (angl. *ventilation-controlled fire*). Produkcia toxických plynov je omnoho väčšia ako v predošlých fázach.

Fáza zániku požiaru je štádium od zníženia intenzity požiaru až po úplne vyhorenie horľavých materiálov. V tejto fáze oheň prechádza do štádia, keď je ovplyvnený hlavne palivom [2].



Obr. 2.1: Vývoj požiaru v interiéri [2].

2.2 Plyny vznikajúce pri požiaroch

Najväčším nebezpečenstvom pri požiaroch sú práve plyny, ktoré pri ňom vznikajú. Podľa štatistik môže priamo dym za približne 41% úmrtí a 46% zranení pri požiaroch [2]. Skorá detekcia dymu a konkrétnych nebezpečných zložiek je podstatná časť protipožiarnej ochrany. Koncentrácia daných plynov sa udáva v *ppm*, čo je výraz pre označenie častíc na jeden milión (angl. *Part per million*), LC_{50} je označenie smrtelnej koncentrácie (angl. *Lethal Concentration*), pri ktorej zomrie 50% testovaných subjektov, LD_{50} je označenie smrtelnej dávky (angl. *Lethal Dose*), pri ktorej zomrie 50% testovaných subjektov, *FEC* je frakčná účinná koncentrácia (angl. *Fractional Effective Concentration*), čo je pomer koncentrácie dráždivej látky ku koncentrácii, pri ktorej sa očakáva, že pri vystavenom subjekte o priemernej citlivosti spôsobí daný efekt.

Nebezpečné plyny vznikajúce pri požiaroch

Počet a koncentrácia plynov vznikajúcich pri požiaroch sa výrazne mení v závislosti na konkrétnych podmienkach, preto nie je možné určiť presné zloženie dymu a množstvo jednotlivých zložiek [2]. Nižšie sú uvedené najpodstatnejšie plyny vznikajúce pri požiaroch.

Oxid uhoľnatý

Oxid uhoľnatý (CO) je bezfarebný jedovatý plyn bez chuti a zápachu. Vzniká pri nedokonalom horení látok obsahujúcich uhlík. Po vdýchnutí sa viaže na hemoglobín, čím znemožňuje prenos kyslíka [15]. Efekt jednotlivých koncentrácií môžeme vidieť v Tabuľke 2.1,

	Koncentrácia [ppm]
Maximálne množstvo pre pracovné prostredie	50
Pobyt po dobu 1 hodiny, bez vážnych následkov	400-500
Pobyt po dobu 1 hodiny, s následkami	1000-2000
Pobyt po dobu 1 hodiny, nebezpečné množstvo	1500-2000
LC_{50} pre človeka (30 min)	3000

Tabuľka 2.1: Efekt koncentrácií CO .

Oxid uhličitý

Oxid uhličitý (CO_2) je hlavným produktom pri požiaroch. Sám o sebe nie je jedovatý, ale pri jeho zvýšenej koncentrácii zrýchľuje dýchanie, čím môže zvýšiť množstvo iných vdýchnutých nebezpečných plynov [15]. Efekt jednotlivých koncentrácií môžeme vidieť v Tabulke 2.2,

	Koncentrácia [ppm]
Maximálne množstvo v pracovnom prostredí	5000
Zreteľne zrýchlenie dýchania, po 30 min známky intoxikácie	50000
Bezvedomie v priebehu niekoľkých minút	70000

Tabuľka 2.2: Efekt koncentrácií CO_2 .

Kyanovodík

Kyanovodík (HCN) vzniká pri horení látok obsahujúcich dusík, ako napríklad nylón, vlna alebo polyuretán. Ide o vysoko jedovatý plyn [15]. Efekt jednotlivých koncentrácií môžeme vidieť v Tabulke 2.3,

	Koncentrácia [ppm]
Lahké symptómy po niekoľkých hodinách	20-40
Pobyt po dobu 1 hodiny bez vážnych následkov	50-60
LC_{50} pre človeka (30 min)	135

Tabuľka 2.3: Efekt koncentrácií HCN .

Kyselina chlorovodíková

Kyselina chlorovodíková (HCl) vzniká pri horení PVC (polyvinylchlorid). Pri vdýchnutí poškodzuje horné dýchacie cesty [15]. Efekt jednotlivých koncentrácií môžeme vidieť v Tabulke 2.4,

	Koncentrácia [ppm]
Maximálna koncentrácia pre krátkodobé vystavenie (30-60 min)	50-60
LC_{50} pre človeka (30 min)	3700

Tabuľka 2.4: Efekt koncentrácií HCl .

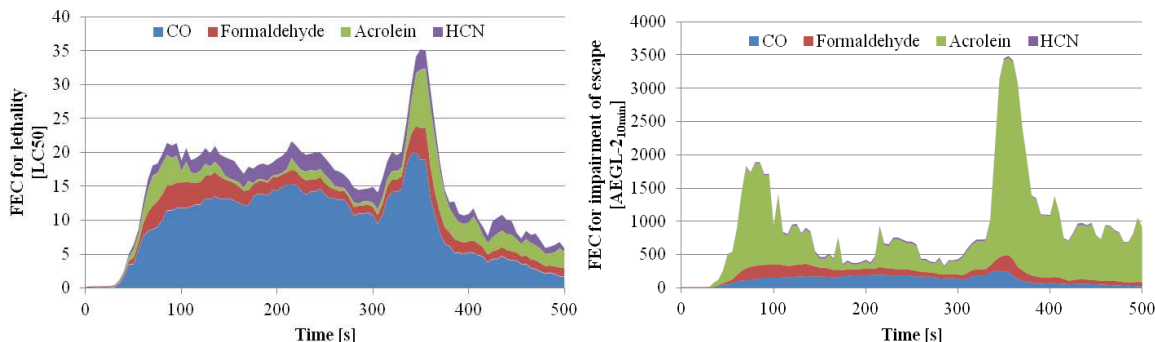
Oxid dusičitý

Oxid dusičitý (NO_2) je vysoko jedovatý plyn, ktorý vzniká pri horení nitrocelulózy. Pri vdýchnutí poškodzuje dýchacie cesty [15].

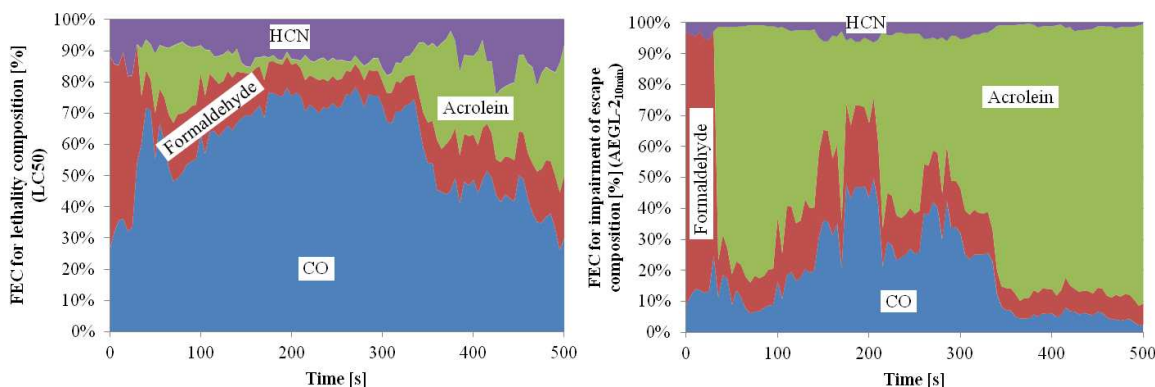
Celkové nebezpečenstvo vzhľadom na podiel jednotlivých plynov

Samotné zloženie dymu je veľmi komplexné a každý komponent má rôzne účinky na ľudský organizmus. Z tohto dôvodu boli vytvorené modely pre hodnotenie toxicity jednotlivých zložiek požiaru a nemožnosti kvôli nim uniknúť. Modely toxicity sú založené na LD_{50} jednotlivých plynov a nemožnosť uniknúť na základe AEGL-2 [2]. Tieto modely sú reprezentov-

vané v grafoch zobrazených na Obr. 2.2 a Obr. 2.3. Z grafov jednoznačne vyplýva, že hlavný podiel na úmrtiach má oxid uhoľnatý a hlavný podiel na znemožnení úteku má akroleín.



Obr. 2.2: FEC pre úrtnosť (vľavo) a nemožnosť utiecť (vpravo), požiar z drevených paliet [2].



Obr. 2.3: Podiel jednotlivých zložiek na úmrtnosť (vľavo) a nemožnosť utiecť (vpravo), požiar z drevených paliet [2].

Produkty horenia bežne sa vyskytujúcich látok v interiéri

Polyetylén a polypropylén

Polyetylén a *polypropylén* patria k polymérom pozostávajúcim z uhlíka a vodíka. Polyetylén sa vo veľkom množstve používa pri výrobe fólií a iných obalových materiálov. Polypropylén sa používa na výrobu lán alebo ako alternatíva k PVC (polyvinylchloridu). Pri ideálnom horení týchto látok sa produkujú iba oxid uhoľčitý a voda, ale pri nedostupnosti kyslíka ich horenie produkuje i veľké množstvo oxidu uhoľnatého [15]. Toxická výdatnosť plyných spodín polyetylénu a polypropylénu je uvedená v Tabuľke 2.5,

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]
Polyetylén	107	1017
Polypropylén	64	1032

Tabuľka 2.5: Toxická výdatnosť plyných spodín polyetylénu a polypropylénu [5].

Polystyrén

Polystyrén je vo veľkom používaný ako izolačný materiál. Hlavným produktom pri jeho horení je styrén, ktorý je v ohni rokladaný na menšie molekuly, ktoré následne reagujú s kyslíkom za vzniku iných bežných plynov vznikajúcich pri požiari. Druhým hlavným produktom je oxid uhoľnatý. Aj napriek tomu, že styrén je takmer rovnako toxický ako oxid uhoľnatý, je produkován v oveľa nižšom množstve [15]. Toxická výdatnosť plyných spodín polystyrénu je uvedená v Tabuľke 2.6.

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	styrén [mg/g]
Polystyrénová doska	72	2316	31,1
Penový polystyrén	287	1435	0,6

Tabuľka 2.6: Toxická výdatnosť plyných spodín polystyrénu [5].

Polyvinylchlorid

Polyvinylchlorid, v skratke PVC, je umelo vyrobený polymér. Je bežne používaný vo vybavení interiérov ako sú napríklad okná alebo podlahy. Pri horení PVC vzniká okrem klasických plynov aj kyselina chlorovodíková (*HCl*). *HCl* je toxickéjšia ako *CO* a je produkována vo väčšom množstve [15]. Toxická výdatnosť plyných spodín PVC je uvedená v Tabuľke 2.7.

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	HCl [mg/g]
PVC koženka	42	1469	83,8
PVC podlahová krytina	47	746	31,4

Tabuľka 2.7: Toxická výdatnosť plyných spodín polystyrénu [5].

Polymetylakrylát

Polymetylakrylát, známy ako plexisklo, produkuje pri zohrievaní metylakrylát. Metylakrylát sa v ohni, podobne ako styrén, rozkladá na menšie molekuly, ktoré reagujú za vzniku bežných plynov. Metylakrylát je nebezpečnejší ako *CO*, pri požiari je však produkován v oveľa nižšom množstve [15]. Toxická výdatnosť plyných spodín polymetylakrylátu je uvedená v Tabuľke 2.8,

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	HCN [mg/g]
Polymetylakrylátová doska	63	1609	8

Tabuľka 2.8: Toxická výdatnosť plyných spodín polymetylakrylátu [5].

Polyuretán

Polyuretán je polymér, ktorý sa používa ako izolačný materiál, lak alebo na textilné vlákna. Pri jeho tepelnom rozklade vznikajú *CO* a *CO₂*, ale aj kyanovodík (*HCN*), ktorý je prudko jedovatý [10]. Toxická výdatnosť plyných spodín polyuretánu je uvedená v Tabuľke 2.9,

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	HCN [mg/g]
Polyuretánová mäkká pena	90	1714	7,2
Pevná polyuretánová pena	155	1538	8,4

Tabuľka 2.9: Toxická výdatnosť plynných splodín polyuretánu [5].

Drevo a celulóza

Drevo a celulóza, ako jeho hlavná zložka, sa skladajú z uhlíka, vodíka a kyslíka. Pri ich horení vznikajú oxid uhličitý, oxid uhoľnatý, uhľovodíky a iné produkty vytvorené z jeho komponentov. Niektoré výpary obsahujúce kyslík, napríklad aldehydy, sú veľmi toxické. Pri ich horení však vzniká oveľa väčšie množstvo CO [15]. Toxická výdatnosť plynných splodín niekoľkých produktov z dreva je uvedená v Tabuľke 2.10,

Látka	CO [mg/g]	CO ₂ [mg/g]	HCN [mg/g]
Smrekové drevo	27	1522	-
Drevotrieska	21	1212	0,8

Tabuľka 2.10: Toxická výdatnosť plynných splodín produktov z dreva [5].

2.3 Zemný plyn

Zemný plyn je prírodný vysoko horľavý plyn. Z chemického hľadiska ide o zmes alkánov s prímiesou vyšších uhľovodíkov a ďalších plynov. Je ľahší ako vzduch, nie je toxický. Je bez zápachu, preto sa pri úprave odorizuje tetrahydrotiofénom, aby bol identifikovateľný.

Zloženie

Zemný plyn je zmes alkánov, hlavne metánu (CH_4), etánu (C_2H_6), propánu (C_3H_8), izobutánu a butánu (C_4H_{10}) a pentánov (C_5H_{12}). Pred distribúciou k odberateľovi sú z neho odstránené C_3 , C_4 a C_5 alkány. Bežne predávaný zemný plyn sa teda skladá hlavne z metánu a etánu [3]. Plné zloženie zemného plynu môžeme vidieť v Tabuľke 2.11.

Zložka	Typické zloženie (mole %)	Rozsah (mol %)
Metán	94,9	87,0 - 96,0
Etán	2,5	1,8 - 5,1
Propán	0,2	0,1 - 1,5
Izobután	0,03	0,01 - 0,3
Bután	0,03	0,01 - 0,3
Izopentán	0,01	stopové množstvo - 0,14
Pentán	0,01	stopové množstvo - 0,14
Hexán	0,01	stopové množstvo - 0,06
Dusík	1,6	1,3 - 5,6
Oxid uhličitý	0,7	0,1 - 1,0
Kyslík	0,02	0,01 - 0,1
Vodík	stopové množstvo	stopové množstvo - 0,02

Tabuľka 2.11: Zloženie zemného plynu [3].

2.4 Technológie na detekciu dymu

Detekciu dymu je možné považovať za základnú protipožiarnu ochranu. Podľa štatistík sa riziko úmrtia znižuje na polovicu ak je objekt vybavený detektormi dymu [1]. Dym môže byť detekovaný buď opticky (fotoelektricky) alebo fyzicky (ionizáciou). Detektory používajú buď jednu alebo kombináciu oboch metód.

Ionizačná metóda

Ionizačné detektory sú založené na vyhodnocovaní poklesu vodivosti v ionizačnej komore. Prietok prúdu medzi elektródami v ionizačnej komore je možný pomocou voľných nábojov produkovaných ionizáciou vzduchu α žiarením. Ako producent α žiarenia sa používa amerícium-241 (^{241}Am). Pri vstupe dymu do ionizačnej komory sa ióny umožňujúce prietok prúdu naviažu na jeho pevné častice, ktoré majú kvôli väčšej hmotnosti a veľkosti oveľa nižšiu pohyblivosť. V dôsledku toho sa zníži vodivosť [4].

Ionizačná metóda je silne závislá na rozdelení veľkostí častíc dymu, pretože šanca na stretnutie častice s iónom sa mení s veľkosťou častice. Všeobecne ale platí, že podstatnejší je počet častíc než hmotnostná koncentrácia dymu. Z tohto dôvodu je táto metóda veľmi citlivá na veľký počet malých častí, ktoré vznikajú napríklad pri horení materiálov z dreva [4].

Fotoelektrická metóda

Fotoelektrické detektory sú založené na detekcii dymu pomocou absorpcie alebo rozptylu žiarenia časticami dymu. Najbežnejšie ide o infračervené žiarenie. Pri fotoelektrických detektoroch sa používajú dve metódy - lineárna a bodová.

Lineárna metóda je založená na absorpcii svetla časticami dymu. Zariadenie pozostáva z IR vysielача a prijímača, ktoré sú priamo oproti sebe. Pri vstupe dymu do komory sa časť žiarenia pohltí, čím sa zníži intenzita žiarenia na IR prijímači. Táto metóda je vhodná na detekciu častíc od 0,1 μm -10 μm [4].

Bodová metóda je založená na rozptyle žiarenia časticami dymu. Zariadenie pozostáva z IR vysielача a prijímača, ktoré sú postavené tak, aby za normálnych okolností žiarenie z vysielача nedopadalo na prijímač. Pri vstupe dymu do komory sa časť žiarenia odrazí a tým pádom sa zvýši intenzita žiarenia dopadajúca na IR prijímač. Táto metóda je vhodná na detekovanie častíc od 4 μm -10 μm .

Fotoelektrická metóda je priamo ovplyvnená intenzitou a vlnovou dĺžkou svetelného zdroja, uhlom rozptylu a veľkosťou častíc dymu. Väčšinou sa pri týchto detektoroch používa IR žiarenie s vlnovou dĺžkou 0,9 μm , preto nie je možné očakávať ich reakciu na častice menšie ako približne 0,1 μm . Z toho vyplýva, že fotoelektrické senzory sú citlivejšie hlavne na veľké častice, ktoré vznikajú v prvej fáze požiaru (Vývoj požiaru v interiéri 2.1) [4].

Porovnanie metód

Výroba ionizačných detektorov je síce menej nákladná, zároveň sú však tieto detektory náchylnejšie na falošný poplach. Dobré a rýchlo reagujú na horiaci požiar. Fotoelektrické detektory naopak pomalšie reagujú na už horiaci požiar, ale rýchlo reagujú na rozklad bez ohňa. V praxi sa ukazuje, že ionizačné detektory reagujú oveľa pomalšie na bežný interiérový požiar ako detektory fotoelektrické [12].

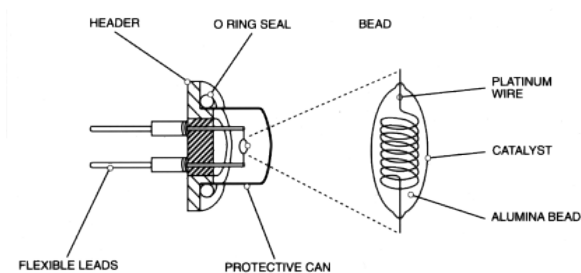
Kvôli týmto problémom niektoré krajiny zakázali používanie ionizačných senzorov a uprednostňuje sa používanie fotoelektrických detektorov.

2.5 Technológie na detekciu plynov

V súčasnosti existuje veľké množstvo senzorov na detekciu plynov. Môžeme ich rozdeliť podľa plynov, ktoré dokážu detekovať, podľa ceny, životnosti alebo použitej technológie na detekciu plynov. Základné typy senzorov podľa technológie detekcie sú katalytické senzory, teplovodivé senzory, elektrochemické senzory, optické senzory, infračervené senzory, polovodičové senzory a senzory na báze akustickej vlny [18].

Katalytické senzory

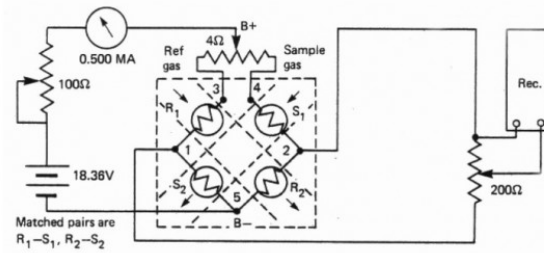
Katalytické senzory je skupina senzorov na meranie horľavých plynov a výparov založených na metóde katalytického spaľovania. V meracej komore senzora je umiestnené rozpálené teleso s katalyticky účinným povrchom, na ktorom prebieha spaľovacia reakcia určenej horľavej látky. Teplom uvoľneným pri reakcii sa zvyšuje teplota telesa, čo sa zvyčajne vyhodnocuje ako zmena elektrického odporu [8]. Schému katalytického senzora môžeme vidieť na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Schéma katalytického senzora [11].

Teplovodivé senzory

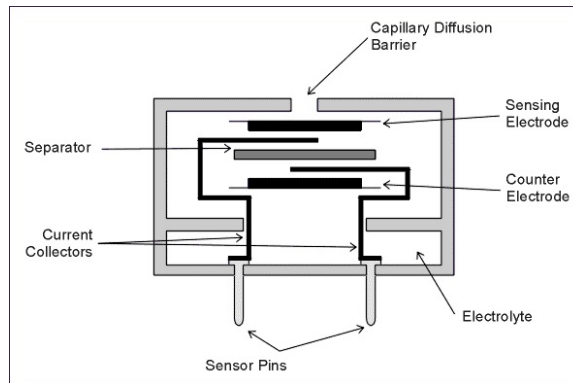
Teplovodivé senzory sú senzory detekujúce plyny s rozdielnou tepelnou vodivosťou ako vzduch. Princíp spočíva v meraní tepelnej straty teplého tela k chladnému prvku cez termálnu vodivosť. Senzory dobre rozlišujú plyny z vysokou tepelnou vodivosťou ako metán a vodík. Naopak, nie je možné detekovať plyny s podobnou tepelnou vodivosťou ako amoniak alebo oxid uhoľnatý. Plyny s nižšou tepelnou vodivosťou ako má vzduch je pomocou týchto senzorov zložitá detekovať kvôli interferenciám. Príkladom sú bután a oxid uhličitý [18]. Schému teplovodivého senzora môžeme vidieť na Obr. 2.5.



Obr. 2.5: Schéma teplovodivého senzoru [16].

Elektrochemické senzory

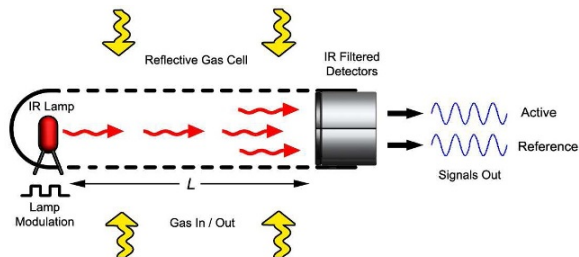
Tento typ senzorov prepúšťa plyny cez membránu na elektródu, kde sú oxidované alebo redukované. Daná reakcia produkuje elektrický signál, ktorý zodpovedá koncentrácii daného plynu. Typicky sa elektrochemické senzory skladajú zo snímacej alebo pracovnej elektródy a opačnej elektródy, ktoré sú oddelené tenkou vrstvou elektrolytu [18]. Schému elektrochemického senzoru môžeme vidieť na Obr. 2.6.



Obr. 2.6: Schéma elektrochemického senzoru [14].

Optické senzory

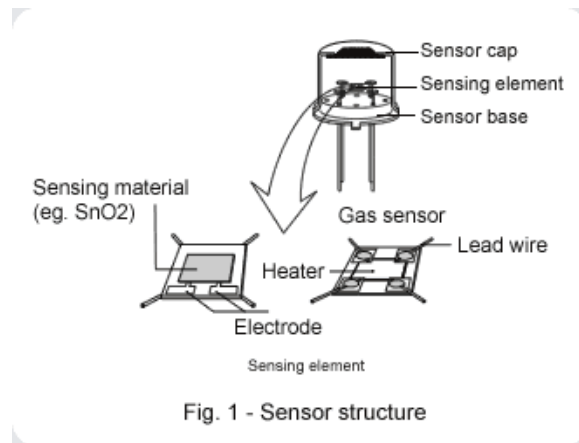
Optické senzory je skupina senzorov, ktorá detekuje prítomnosť plynu pomocou merania absorpcie/emisie a rozptylu žiarenia sledovaným plynom. Optický senzor sa skladá zo svetelného zdroja, fotodetektora, jednotky na detekciu plynu reagujúcej na svetlo, filtra na zbieranie fluorescencie a fosforescencie. Medzi najbezpečnejšie druhy optických senzorov patria infračervené senzory [18]. Schému infračerveného senzoru môžeme vidieť na Obr 2.7.



Obr. 2.7: Schéma optického senzoru [13].

Polovodičové senzory

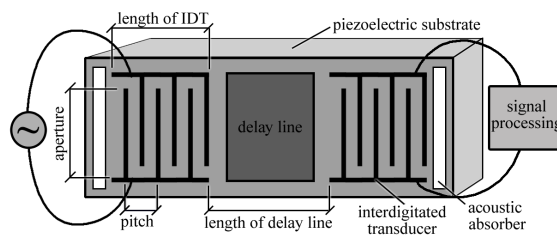
Tento typ senzorov je používaný na meranie koncentrácie plynu. Pracujú na princípe vratnej absorpcie plynu na povrchu rozohriatých oxidov kovov. Zvyčajne ide o oxidy cínu uložené na kremíku metódou chemickej depozície z pár. Absorpcia plynu na povrchu oxidu a následná katalytická oxidácia spôsobí zmenu v elektrickom odpore senzora [18]. Schému senzoru je možné vidieť na Obr. 2.8.



Obr. 2.8: Schéma polovodičového senzoru [17].

Senzory na báze akustickej vlny

Senzory na báze akustickej vlny používajú ako detekčný mechanizmus mechanickú alebo akustickú vlnu. Ako sa akustická vlna šíri cez materiál alebo jeho povrch, všetky zmeny v charakteristickom šírení ovplyvňujú frekvenciu a/alebo amplitúdu vlny. Tieto zmeny sú následne zaznamenané [18]. Schému senzoru na báze akustickej vlny môžeme vidieť na Obr. 2.9.



Obr. 2.9: Schéma senzoru na báze akustickej vlny [7].

Porovnanie technológií

Každá z vyššie spomínaných technológií na detekciu plynov má viaceré výhody a nevýhody. Samotná aplikácia konkrétnej technológie závisí na prostredí, v ktorom je umiestená, na konkrétnom použití a cene [18]. Prehľad výhod a nevýhod pre jednotlivé kategórie je uvedený v Tabuľke 2.12.

Technológia	Výhody	Nevýhody
Katalytické	<ul style="list-style-type: none"> – Jednoduchá a lacná technológia na meranie horľavých plynov. 	<ul style="list-style-type: none"> – Potrebujú kyslík. – Môžu byť "otrávené" olovom, chlóróm alebo kremíkom.
Teplovodivé	<ul style="list-style-type: none"> – Robustná, ale jednoduchá konštrukcia. – Nepotrebujú kyslík. – Široký rozsah merania. 	<ul style="list-style-type: none"> – Reakcia prebieha na horúcom drôte.
Elektrochemické	<ul style="list-style-type: none"> – Možnosť merania toxických plynov pri relatívne nízkych koncentráciách. – Široké spektrum merateľných plynov. 	<ul style="list-style-type: none"> – Nemožnosť odhalenia porúch bez pokročilých monitorovacích techník.
Optické	<ul style="list-style-type: none"> – Nepotrebujú kyslík. – Nie sú ovplyvnené elektromagnetickým rušením. – Široké monitorovacie pole. 	<ul style="list-style-type: none"> – Ovplyvnené interferenciou okolitého svetla.
Infračervené	<ul style="list-style-type: none"> – Používajú iba fyzickú techniku. – Májú iba viditeľné poruchy. – Môžu byť použité v inertnej atmosfére. 	<ul style="list-style-type: none"> – Nie všetky plyny absorbujú IP žiarenie. – Sekvenčné monitorovanie je pomalšie a vyžaduje odborného užívateľa.
Polovodičové	<ul style="list-style-type: none"> – Mechanicky robustné. – Dobre fungujú pri konštantnej vlhkosti. 	<ul style="list-style-type: none"> – Náchylné na kontamináciu a zmeny v prostredí. – Nelineárny priebeh merania
Akustická vlna	<ul style="list-style-type: none"> – Detekujú nervovo-paralytické a pľuzgierotvorné plyny. – Nepotrebujú batériu a môžu byť použité pre bezdrôtové aplikácie. – Môžu byť umiestnené na pohybujúcich sa častiach. 	<ul style="list-style-type: none"> – Kvôli malej veľkosti je problém s manipuláciou pri výrobnom procese.

Tabuľka 2.12: Porovnanie technológií na detekciu plynov [18].

2.6 Zhrnutie

V tejto kapitole boli uvedené informácie o plynach vznikajúcich pri požiari, aká je ich toxicita a aké množstvo týchto plynov vzniká pri horení bežných materiálov v interiéri. Ďalej boli uvedené informácie o zemnom plyne a jeho zložkách. V závere boli opísané najbežnejšie technológie na detekciu dymu a plynov, ich výhody a nevýhody. Na základe týchto informácií je možné vysloviť niekoľko tvrdení, na ktorých sú postavené ďalšie kapitoly.

- Z nebezpečných plynov vznikajúcich pri požiari je najpodstatnejšie sledovať koncentráciu oxidu uhoľnatého. Okrem toho je vhodné sledovať aj koncentráciu oxidu uhličitého.
- Pri detekcii zemného plynu je možné sa obmedziť na detekciu metánu, keďže je to jeho hlavná zložka.
- Ideálnou technológiou na detekciu dymu sú fotoelektrické senzory, keďže sú rýchlejšie a detekujú požiar v jeho počiatkovej fáze.
- Fotoelektrická bodová metóda pri použití IR žiarenia okolo 900 nm dokáže detekovať častice od 4 do 10 μm .
- Pri výbere technológie na detekciu plynov nie je možné určiť ideálnu technológiu. Je potrebné vyberať senzor na základe jeho konkrétnych špecifikácií.

Kapitola 3

Návrh systému

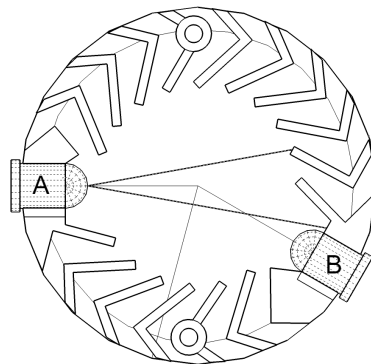
Vrámci tohto projektu je potrebné navrhnuť zariadenie, ktoré dokáže detekovať dym, merať koncentráciu nebezpečných plynov vznikajúcich pri požiari a zemného plynu. Ďalej je nutné navrhnuť serverovú aplikáciu, ktorá bude dáta zo zariadenia prijímať, archivovať ich a vizualizovať a zároveň vybrať vhodný komunikačný protokol.

3.1 Sensory

Výber správnych senzorov je pre zariadenie kľúčové. Pri senzoroch je potrebné dbať hlavne na ich spoľahlivosť a vysokú citlivosť, aby bolo možné dostatočne skoro detekovať požiar a jedovaté plyny. Následne je podstatné vziať v úvahu ich životnosť, dostupnosť a samozrejme i cenu.

Senzor na detekciu dymu

Ako vyplýva z prvej kapitoly, ideálna technológia na detekciu dymu je fotoelektrická bodová metóda. Navrhovaný senzor používa IR žiarenie o vlnovej dĺžke $0,9\ \mu\text{m}$, čo zodpovedá bežne dostupným detektorom dymu. Zdroj žiarenia a fotocitlivá jednotka sú umiestnené v optickej komore (labyrinte) tak, aby pri bežných podmienkach žiadne žiarenie produkované zdrojom nedopadalo na fotocitlivú jednotku. Optická komora je izolovaná od okolitého žiarenia. V prípade, že sa do optickej komory dostanú častice dymu, žiarenie sa od nich odrazí na fotocitlivú jednotku, čo následne zachytí mikrokontrolér. Návrh optickej komory je možné vidieť na Obrázku 3.1.

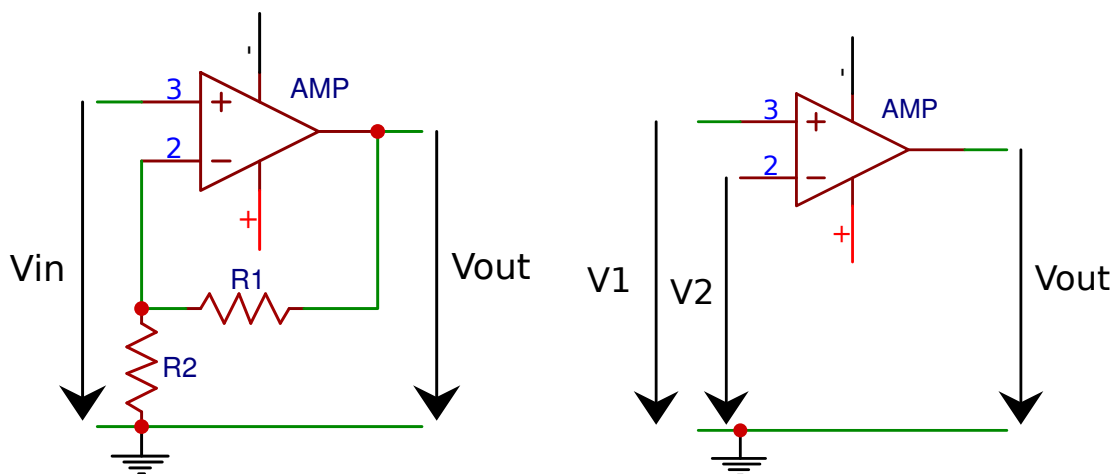


Obr. 3.1: Návrh optickej komory: A–Zdroj žiarenia, B–Fotocitlivá jednotka.

Ako zdroj žiarenia je použitá LED dióda s výkonnou špičkou na vlnovej dĺžke 940 nm a ako fotocitlivá jednotka je použitý fototranzistor, ktorý je na túto vlnovú dĺžku citlivý. IR žiarenie dopadajúce na kolektorový PN prechod fototranzistoru otvorí priechod medzi bázou a emitorom. Fototranzistor sa otvorí a prepúšťa napätie, ktorého veľkosť je úmerná intenzite dopadajúceho žiarenia.

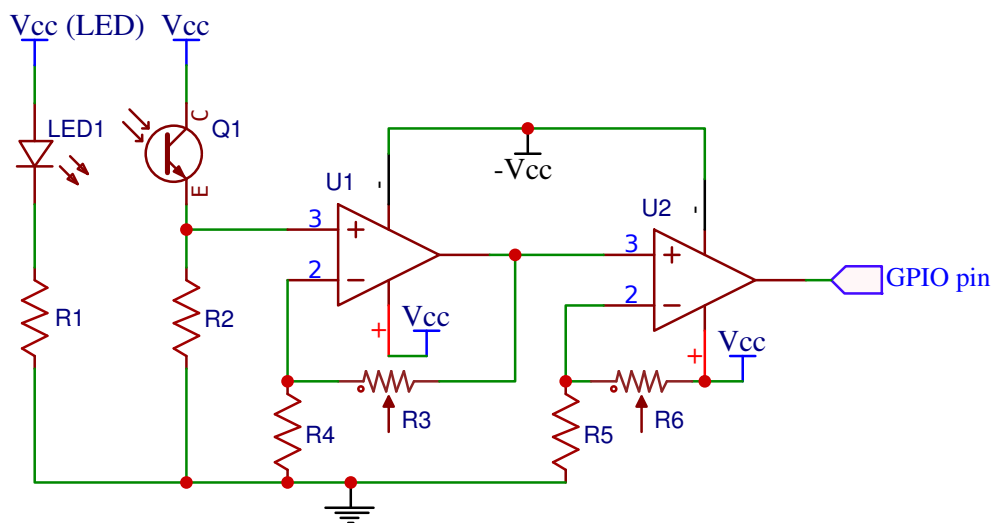
Kedže intenzita žiarenia odrazeného od častíc dymu je veľmi malá, nie je možné takto malé napätie zachytávať priamo mikrokontrolérom. Aby bolo možné takéto nízke napätie spracovať, je potrebné ho zväčšiť pomocou operačného zosilovača. Pre tento problém je použité zapojenie neinvertujúceho operačného zosilovača (Obr 3.2 vľavo). Zosílenie napätia je udané ako $A_V = 1 + \frac{R_1}{R_2}$ a teda výsledné napätie V_{out} je vyjadrené ako $V_{out} = A_V * V_{in}$, kde V_{in} je vstupné napätie. Výstup fototranzistoru je pripojený na neinvertujúci pin operačného zosilovača. Takto zväčšené napätie je už možné detekovať pomocou mikrokontroléra.

Pri priamom zapojení takto upraveného výstupu senzora na mikrokontrolér nastáva problém s efektívnou detekciou zmeny medzi čistým vzduchom a dymom. Kedže pri tomto senzore je potrebné zachytávať iba binárny výstup (čistý vzduch/dym), nie je potrebná analógová zmena napätia, ktorá nastáva so zmenou intenzity žiarenia. Aby bol docieľený iba binárny výstup, je výstup pripojený na komparačný zosilovač, komparátor (Obr 3.2 vpravo). Komparátor porovnáva vstupné napätia na invertujúcom (označený $-$, napätie V_1) a neinvertujúcom (označený $+$, napätie V_2) vstupnom pine. Pričom platí $V_1 > V_2 \Rightarrow V_{out} = 1$ a $V_1 < V_2 \Rightarrow V_{out} = 0$, kde V_{out} je výstupné napätie a 0, 1 sú logická 0 a logická 1. Na neinvertujúci pin je pripojený zosilnený výstup fototranzistoru a invertujúci pin je pripojený referenčné napätie, ktoré zodpovedá maximálne zachytenému napätiu pri vzduchu bez dymu. Takto upravený výstup je jednoducho a efektívne detekovateľný mikrokontrolérom.



Obr. 3.2: Zapojenie neinvertujúceho operačného zosilovača (vľavo), zapojenie komparačného zosilovača, komparátoru (vpravo).

Návrh obvodu pre fotoelektrický senzor dymu je možné vidieť na Obrázku 3.3. Úplnú schému zapojenia a použitých súčiastok je možné nájsť v prílohách (A.2).



Obr. 3.3: Návrh obvodu fotoelektrického senzoru.

Detekcia zemného plynu a LPG MQ-2, MQ-6

MQ-2 a MQ-6 sú polovodičové senzory so senzitívnou vrstvou vyrobenou z oxidu ciničitého (SnO_2). Tieto senzory sú vysoko citlivé na zemný plyn (metán) a LPG (propán, bután). MQ-2 dokáže ešte detekovať ešte výpary alkoholu a dym. MQ-6 má nízku senzitivitu na výpary alkoholu. Vďaka týmto výhodám je senzor ideálny na detekovanie únikov zemného plynu a LPG, keďže nie je ovplyvňovaný výparmi alkoholu (napríklad pri varení) alebo cigaretovým dymom. Ďalšou výhodou týchto senzorov je ich dlhodobá stabilita pri meraní a nízka cena.

Detekciu oxidu uhoľnatého MQ-7, MQ-9

Jedná sa o polovodičové senzory, kde senzitívnym materiálom je oxid ciničitý (SnO_2). So zvyšujúcou sa koncentráciou detekovaného plynu sa zvyšuje i vodivosť senzoru. Charakteristickými vlastnosťami pre tieto senzory sú vysoká citlivosť na oxid uhoľnatý (CO), dlhá životnosť a jednoduchý napájací obvod.

MQ-7 dokáže detekovať CO v koncentráciách od 20-2000 ppm. Senzor má dva módy. Mód nízkeho rozohriatia žeraviaceho vlákna ($V_H = 1,5V$), pri ktorom dokáže detekovať CO a mód vysokého rozohriatia žeraviaceho vlákna ($V_H = 5V$), pri ktorom odstraňuje zo žeraviaceho telesa ostatné plyny absorbované pri nízkej teplote.

MQ-9 dokáže detekovať CO i horľavé plyny. CO dokáže merať v koncentráciách 10-1000ppm. Rovnako ako MQ-7 pri móde nízkeho rozohriatia žeraviaceho vlákna ($V_H = 1,5V$) sníma CO , ale pri móde vysokého rozohriatia žeraviaceho vlákna ($V_H = 5V$) sníma horľavé plyny (metán, propán).

Detekcia oxidu uhličitého MG811

MG811 je elektro-chemický senzor na detekciu oxidu uhličitého (CO_2). Pri vstupe CO_2 do komory senzoru nastávajú chemické reakcie, ktorých výstupom je merateľný elektrický signál. Senzor sa vyznačuje dobrou citlivosťou na CO_2 a zároveň minimálne reaguje na iné plyny. Výstup je minimálne ovplyvnený teplotou a vlhkosťou vzduchu. Nevýhodou senzoru je jeho vyššia cena.

Meranie teploty MAX6675, termočlánok typu K

Keďže vlastnosti polovodičových senzorov sa menia s teplotou a vlhkosťou, je potrebné merať obidve veličiny, aby bolo možné opraviť ich výstupné hodnoty.

Na meranie teploty je použitý termočlánok typu K, ktorého rozsah teplôt je od $-200\text{ }^\circ\text{C}$ po $1250\text{ }^\circ\text{C}$. Aby bolo možné digitalizovať teplotu z termočlánku, je použitý integrovaný obvod *MAX6675*. Tento integrovaný obvod dokáže previesť hodnotu z termočlánku s 12bitovým rozlíšením na teplotu s presnosťou $0,25\text{ }^\circ\text{C}$. Následne ju dokáže odoslať cez jednosmerné sériové periférne rozhranie (SPI – Serial Peripheral Interface).

Meranie vlhkosti vzduchu DHT11

Na meranie vlhkosti vzduchu je použitý senzor *DHT11*. Ide o plne digitálny senzor, ktorý dokáže merať vlhkosť v rozmedzí medzi 20 - 90% s presnosťou $\pm 4\%$. Nameranú hodnotu odosiela pomocou technológie 1-Wire. Hlavnou výhodou tohto senzoru je jeho nízka cena a dlhodobá stabilita.

3.2 Mikrokontrolér ESP32

Aby bolo možné zbierať údaje z jednotlivých senzorov, je potrebné, aby navrhovaný systém obsahoval jednotku, ktorá dokáže s týmito senzormi komunikovať. Táto jednotka musí obsahovať rozhrania kompatibilné s rozhraniami na senzoroch, dostatočný výkon, aby bolo možné získané hodnoty v reálnom čase spracovať a rozhranie, pomocou ktorého môže komunikovať so zvyškom systému. Ako vhodné riešenie sa ponúka mikrokontrolér *ESP32* od *Espressif Systems*.

Tento mikrokontrolér má dostatočný výkon na spracovanie dát zo senzorov a nízku spotrebou energie. Ďalej obsahuje vstavané Wi-Fi a Bluetooth moduly, pomocou ktorých je možné zabezpečiť bezdrôtové pripojenie do systému a dostatočný počet a druh periférnych rozhraní na pripojenie senzorov. Vybrané špecifikácie tohto mikrokontroléra je možné vidieť v Tabuľke 3.1. Vďaka týmto vlastnostiam je vhodný pre použitie do navrhovaného systému. Konkrétne pre tento systém je použitá implementácia *Geeknet ESP32*.

CPU:	jedno/dvoj jadrový mikroprocesor Tensilica Xtensa LX6 32bit
Pamäť:	500KiB SRAM
Bezdrôtové spojenie:	Wi-Fi: 802.11 b/g/n
	Bluetooth: v4.2 BR/EDR and BLE
Rozhrania periférií:	12bitový analogovo-digitálny prevodník
	36× GPIO pinov
	4× SPI
Bezpečnosť:	Podpora IEEE 802.11 štandardu
	Hardverová akcelerácia AES, SHA-2, RSA a generátoru náhodných čísel

Tabuľka 3.1: Vybrané špecifikácie *ESP32*.

3.3 Konektorový shield

Pri používaní vyššie uvedených senzorov s mikrokontrolérom *ESP32* vzniká niekoľko problémov. Rôzne senzory potrebujú rôzne napájacie napätie a zároveň majú väčší odber ako dokáže poskytnúť GPIO pin. Taktiež analogovo-digitálny prevodník *ESP32* dokáže prevádzať iba do napätia 1,1 V (pri útlme signálu dokáže pracovať až do 3,3 V), čo je menej ako výstup niekoľkých senzorov. Tieto problémy nie je možné riešiť mikroprocesorom, ale je potrebné pripraviť externý modul.

Komponenty systému potrebujú napájacie napätia 1,5 V (*MQ-9*), 3,3 V (*ESP32*, *MAX6675*, *DHT11*, *Fototranzistor*) a 5 V (*MQ-2*, *MQ-6*, *MG811*, *IR LED*, *Siréna*). Keďže pre napájacie napätie 5 V je dostupné veľké množstvo rôzne výkonných adaptérov, je možné ho do systému jednoducho pripojiť. Ostatné napätia budú regulované práve z neho. Modul *Geeknet ESP32* obsahuje napäťový regulátor *NCP1117*, ktorého výstup je 3,3 V a maximálny výstupný prúd je 1 A. Keďže súčet maximálneho odoberaného prúdu komponentov zapojených na tento regulátor je menší ako 310 mA, dokáže *NCP1117* stabilne regulovať požadované napätie z 5 V zdroja. Napájacie napätie 1,5 V používa iba senzor *MQ-9*, preto je potrebné pridať napäťový regulátor, ktorý dokáže stabilne dodať prúd aspoň 110 mA. Tento regulátor bude pripojený na 5 V zdroj, aby sa predišlo zbytočnému zaťažovaniu 3,3 V regulátora. Prehľad napájacieho napätia a prúdu, ktoré jednotlivé komponenty odoberajú, je možné vidieť v Tabuľke 3.2.

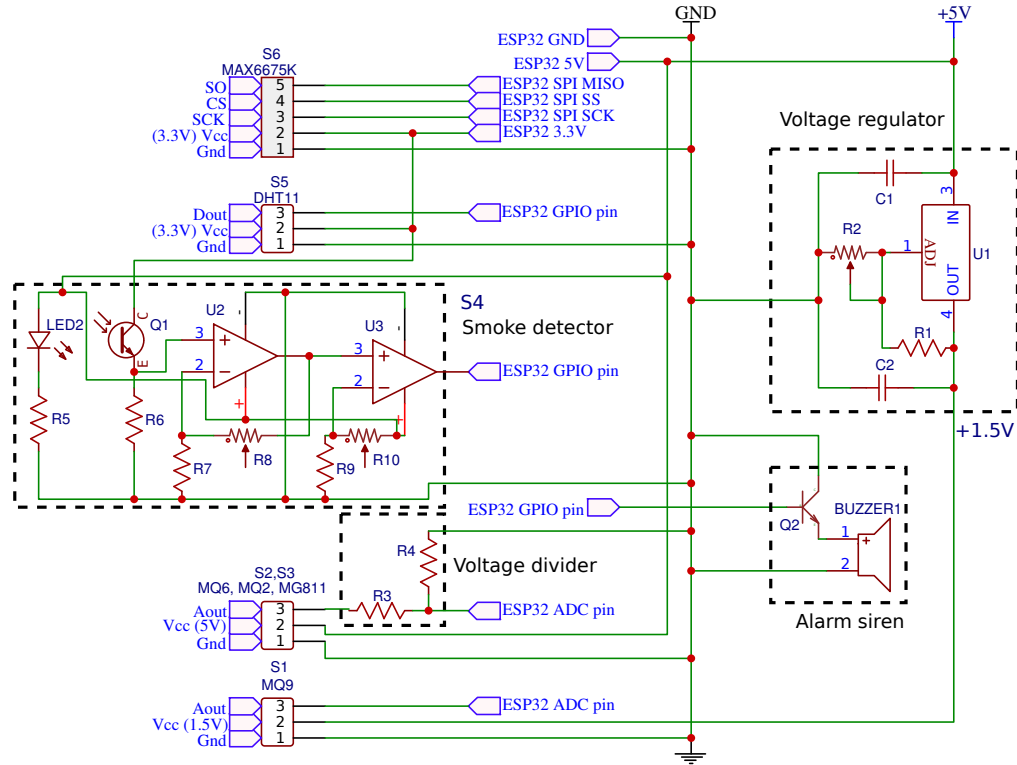
	V_{cc} [V]	I_{max} [mA]
<i>MQ-9</i>	1,5	106
<i>ESP32</i>	3,3	300
<i>MAX6675</i>	3,3	1,5
<i>DHT11</i>	3,3	0,3
<i>Fototranzistor</i>	3,3	3,3
<i>IR LED</i>	5	50
<i>MQ-2</i>	5	160
<i>MQ-6</i>	5	150
<i>MG811</i>	5	240

Tabuľka 3.2: Napájacie napätia a maximálny odoberaný prúd jednotlivých komponentov.

Senzory, ktorých napájacie napätie je 5 V majú analogový výstup v rozmedzí 0 až 5 V. Analogovo-digitálny prevodník na *ESP32* dokáže ale prevádzať iba hodnoty do 3,3 V. Tento

problém je možné riešiť napäťovým deličom zloženým z dvoch rezistorov v sérii. Výstupné napätie bude merané za prvým rezistorom. Je možné vyjadriť to vzťahom $V_{out} = V_{in} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, kde V_{in} je vstupné napätie, V_{out} je výstupné napätie a R_1, R_2 sú odpory prvého a druhého rezistoru.

Návrh obvodu a zapojenia pre konektorový shield riešiaci tieto problémy je možné vidieť na Obr. 3.4. Úplnú schému a návrh dosky plošných spojov je v prílohách (A.1).



Obr. 3.4: Návrh obvodu fotoelektrického senzoru.

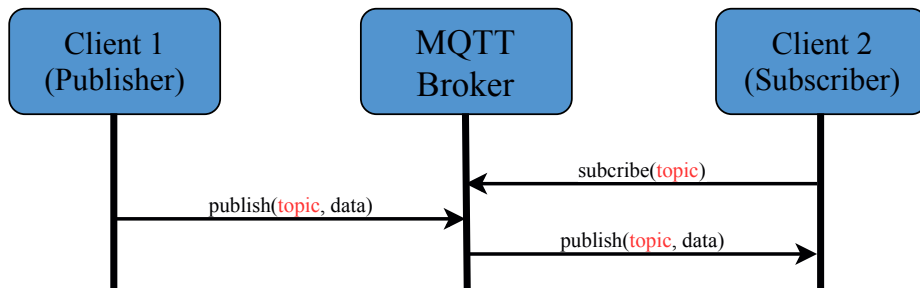
3.4 Protokol MQTT

Aby bolo možné komunikovať medzi zariadením a zvyškom systému, je potrebné zvoliť spôsob komunikácie a s tým spojený komunikačný protokol. Protokol *MQTT* (pôvodne *Message Queuing Telemetry Transport*, aktuálne *MQ Telemetry Transport*) je jednoduchý a nenáročný protokol na odovzdávanie správ medzi klientmi pomocou centrálného bodu – brokera. Protokol bol pôvodne vyvíjaný firmou *IBM*, momentálne je spravovaný konsorciom *Eclipse Foundation*. Protokol je od roku 2013 štandardizovaný *OASIS* a je súčasťou *ISO* štandardu (*ISO/IEC PRF 20922*). *MQTT* je aplikačný protokol postavený nad *TCP/IP*.

Centrálnym bodom architektúry *MQTT* je broker. Ten v sieti pôsobí ako prístupový bod pre všetkých klientov. Každý klient pripojený na broker sa môže prihlásiť na odoberanie (angl. *subscribe*) nejakej témy (angl. *topic*) a zároveň môže do ľubovolnej témy správy publikovať (angl. *publish message*). Broker následne rozposiela všetky publikované správy danej témy klientom, ktorí majú na danej téme aktívny odber. Vzhľadom k tomu, každý klient dostáva iba správy, ktoré sa ho týkajú. Architektúru *MQTT* je možné vidieť na Obrázku 3.5.

MQTT obsahuje i možnosť správy kvality služieb (angl. *Quality of Service, QoS*). Každá správa má označený svoj stupeň dôležitosti a podľa toho sú rozdelené do troch kategórií:

- *QoS 0* - najnižší stupeň, správa je doručená bez potvrdenia a nie je garantované jej doručenie.
- *QoS 1* - pri tomto stupni je garantované, že správa dôjde aspoň jedenkrát.
- *QoS 2* - najvyšší stupeň, je garantované, že správa dôjde práve jedenkrát.



Obr. 3.5: Architektúra MQTT.

Na zabezpečenie MQTT ponúka niekoľko možností. Prvou možnosťou je overovanie klienta pri prihlásení na broker. Každý klient sa prihlasuje pomocou unikátneho identifikátora (angl. *client ID*) a hesla. Keďže MQTT podporuje *SSL/TLS*, je možné sa na broker prihlásiť aj pomocou klientského *SSL* certifikátu. Protokol MQTT ale nie je šifrovaný, ak je potrebný bezpečný prenos dát, je nutné použiť protokoly *SSL/TLS*.

Kvôli týmto vlastnostiam je protokol *MQTT* vhodný ako komunikačný protokol pre navrhovaný systém. V systéme bude senzor pripojený ako klient, ktorý bude publikovať správy do tém rozdelených pre jednotlivé plyny a dym. Server na vizualizáciu bude prihlásený na odoberanie všetkých týchto tém. Správy bude následne ukladať a vizualizovať. Bezpečnosť systému bude zabezpečená pomocou prihlasovania sa na broker klientskými certifikátmi, ktoré sú podpísané brokerom a prenos dát bude prebiehať cez *SSL/TLS*. Kvalita služieb pre rôzne prioritné správy bude riešená nastavovaním *QoS* (detekcia dymu).

3.5 Server

Súčasťou navrhovaného systému je i server, ktorý ukladá výsledky meraní a poskytuje webovú aplikáciu na vizualizáciu. Server je schopný požiadať senzor o nové dáta. Webová aplikácia musí mať stále aktuálne dáta.

Na ukladanie dát získaných zo senzoru server používa relačný databázový systém *SQL*. Databáza obsahuje samostatnú tabuľku pre každý plyn, v ktorej budú záznamy v tvare dátum a čas merania a koncentrácia plynu v ppm. Pri každej doručenej správe senzor hodnotu uloží s aktuálnym časom na serveri.

Aby bola zabezpečená aktuálnosť dát zobrazených webovou aplikáciou, táto aplikácia sa periodicky pýta servera, či nenastala zmena v niektorej tabuľke. Pokiaľ sa vyskytla nová hodnota na nejakej zo zobrazených veličín, budú nové dáta preposlané webovej aplikácii.

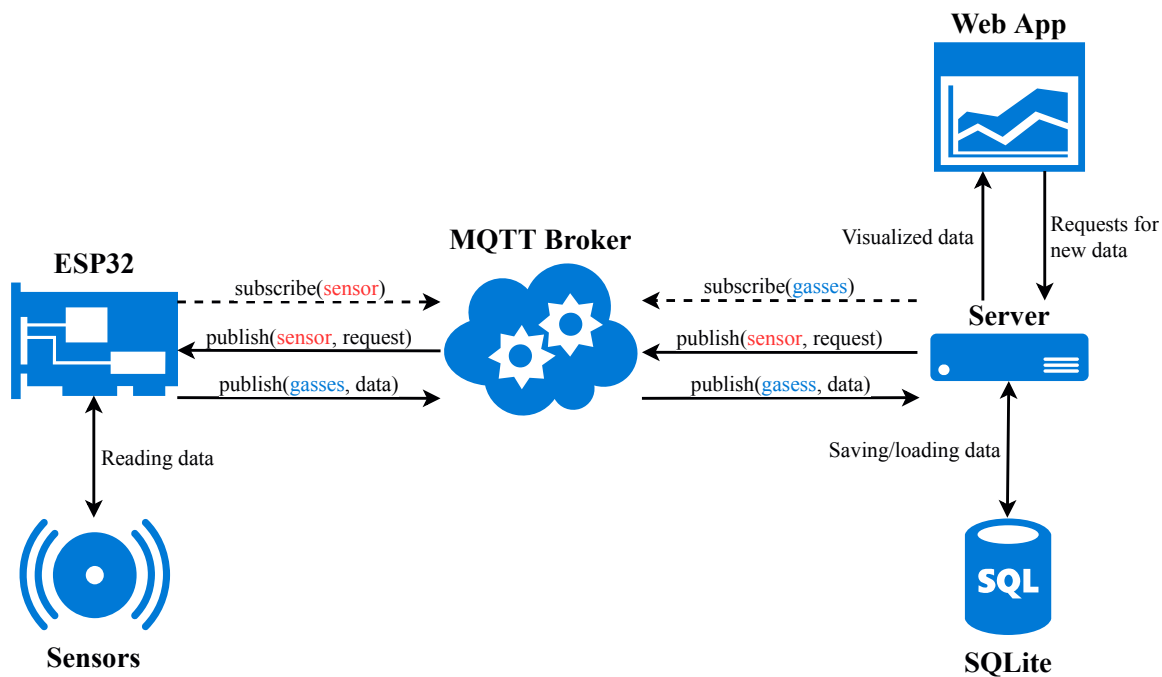
3.6 Zhrnutie

V tejto kapitole bola navrhnutá štruktúra celého systému. Systém sa skladá z troch komponentov - jednotky na získavanie dát, centrálnemu bodu na spojenie komponentov systému a serveru, ktorý bude údaje ukladať a vizualizovať. Diagram systému je možné vidieť na Obrázku 3.6.

Jednotka na získavanie dát je tvorená z *ESP32*, modulu na napájanie a senzorov cez neho pripojených. Mikrokontrolér *ESP32* je pripojený na Wi-Fi sieť a pomocou protokolu *MQTT* sa pripája na broker. Periodicky bude publikovať do tém pre všetky merané veličiny ich aktuálne hodnoty a bude sledovať tému, v ktorej server môže žiadať o meranie konkrétnej veličiny. Modul na napájanie poskytuje stabilne rôzne napätie a prúd pre *ESP32* a jednotlivé senzory. Tak isto delí napätie na výstupe niektorých senzorov, aby bolo v rozsahu vhodnom pre mikroprocesor. Pripojené sú senzory na detekciu dymu, meranie koncentrácie plynov (*CO*, *CO₂*, *CH₄*, *LPG*), teplotu a vlhkosť.

Centrálnym bodom je *MQTT* broker. Poskytuje koncový bod pre všetky pripojené jednotky, preposiela správy klientom podľa ich sledovaných tém a zabezpečuje dodržanie kvality služieb. Aby bola zabezpečená bezpečnosť systému, všetci klienti sa musia overovať certifikátom podpísaným brokerom a prenos bude zabezpečený protokolmi *SSL/TLS*.

Server je pripojený na broker, má aktívny odber na témy meraných veličín a v prípade potreby publikuje do témy na žiadanie údajov od senzorov. Dáta sú ukladané do databázy pomocou systému *SQL*. Webová aplikácia zobrazuje dáta dodané serverom a periodicky sa pýta servera, či nenastali zmeny v zobrazovaných dátach.



Obr. 3.6: Diagram navrhnutého systému.

Kapitola 4

Implementácia systému

Na základe návrhu systému sú v tejto kapitole opísané jeho jednotlivé komponenty. Ide o jednotku na získavanie dát, serverovú aplikáciu na archiváciu a vizualizáciu dát a komunikačný protokol medzi nimi.

4.1 Jednotka na získavanie dát

Aby bolo zabezpečené správne fungovanie všetkých funkcií tejto jednotky, sú všetky hlavné funkcie implemetované ako prerušenia. Základom je periodicky vyvolávané prerušenie na časovač, aby boli zmerané a odoslané všetky merané veličiny. Aby bolo zaručené rýchle spracovanie prerušenia, samotné meranie prebieha až v hlavnom cykle programu. Každá veličina je po odmeraní publikovaná do samostatnej témy.

Zariadenie poskytuje možnosť merania a odoslania iba konkrétnej veličiny. Aby to bolo zabezpečené zariadenie má nastavené odoberanie témy so svojím menom, kde môže server publikovať požiadavky na merania. Tieto požiadavky nie sú považované za kritické časti systému, preto nie sú spracovávané ako prerušenie, ale iba v hlavnom cykle programu.

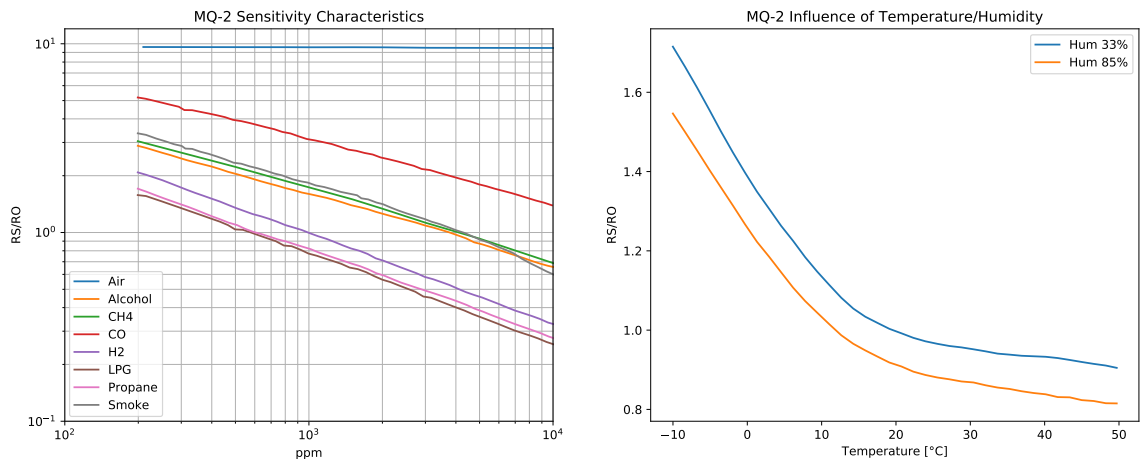
Detekcia dymu

Detekcia dymu je zabezpečená bodovým fotoelektrickým senzorom, ktorý bol navrhnutý v predošlej kapitole. Optická komora je podľa návrhu vytlačená na 3D tlačiarňi. Pri tejto implementácii vzniká problém, že PLA (polymerizovaná kyselina mliečna) - plast, z ktorého je model vytlačený, neblokuje IR žiarenie. Optická komora má preto povrchovú úpravu polyuretánovým lakom. Po tejto úprave spĺňa optická komora všetky požiadavky z návrhu.

Kvôli zabezpečeniu rýchlej reakcie senzora na spozorovaný dym je v implementácii nastavené prerušenie pri zmene na *GPIO* pine, kde je senzor pripojený. Keď žiarenie odrazené od častíc dymu dopadne na fototranzistor, je pomocou operačného zosilňovača a komparátora vygenerovaná nástupná hrana. Keďže takto odrazené žiarenie nedopadá stabilne, vyvoláva rýchle zmeny v signáli, preto je nutné po prvej zachytenej nástupnej hrane prerušenie na chvíľu zablokovať. Po zachytení prerušenia je spustená poplašná siréna a publikovaná správa do témy *dym*, ktorá má nastavenú kvalitu služby na *QoS 2*. Tým je zabezpečená rýchla reakcia v mieste vzniku dymu a garantované zobrazenie na serveri.

Detekcia plynov

Senzory typu *MQ* reagujú na zvýšenie koncentráciu plynov zvýšením ich vodivosti. To je možné pozorovať zvýšením napätia na výstupe senzoru. Výstup týchto sensorov je teda analogový. Mikrokontrolér ich výstup premení na digitálnu hodnotu pomocou analógovo-digitálneho prevodníka. Takto získanú hodnotu je potrebné interpretovať na koncentráciu konkrétneho plynu. Tento prevod je možné vytvoriť z Obr. 4.1 (vľavo), kde je zobrazená závislosť podielu aktuálne nameraného odporu senzoru (R_s) a odporu senzoru v čistom vzduchu (R_o) na koncentrácii konkrétneho plynu. Hodnoty v tomto grafe boli namerané vždy pri konštantnej teplote a vlhkosti ($MQ-2$ $t = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 65\%$), preto je treba výslednú hodnotu ešte upraviť podľa teploty a vlhkosti vzduchu (Obr. 4.1 vpravo).



Obr. 4.1: (*MQ-2*) Závislosť $\frac{R_s}{R_o}$ na koncentrácii plynov (vpravo)
Závislosť $\frac{R_s}{R_o}$ na teplote pri určitých vlhkostiach vzduchu (vľavo).

Aktuálny odpor senzoru je možné vyjadriť ako $R_s = \frac{V_{cc} - V_{RL}}{V_{RL}} * R_L$, kde V_{cc} je napätie, na ktoré je senzor pripojený, V_{RL} je namerané napätie na výstupe senzoru a R_L je celkový odpor senzoru. Keďže je napätie prevedené analógovo-digitálnym prevodníkom, je možné ho vyjadriť ako $V_{RL} = \frac{V_{cc} * x}{X_{max}}$, kde x je digitálna hodnota nameraná pri tomto napätí a X_{max} je digitálna hodnota napájacieho napätia (V_{cc}). Po dosadení tohto vzťahu do pôvodného vzorca dostaneme funkciu na výpočet odporu senzoru z hodnoty na vstupe:

$$R_s = \frac{X_{max} - x}{x} * R_L$$

Pre získanie odporu senzoru v čistom vzduchu (R_o) je potrebné najprv kalibrovať senzor zistením aktuálneho odporu v prostredí, ktoré budeme považovať za prostredie s čistým vzduchom. Následne je táto hodnota predelená pomerom $\frac{R_s}{R_o}$ vyčítaného z datasheetu (P_{air}) (Obr. 4.1 vľavo). Funkcia na získanie odporu senzoru v čistom vzduchu je teda:

$$R_o = \frac{R_s}{P_{air}}$$

V implementácii je aktuálny odpor meraný vždy niekoľkokrát a následne urobený priemer týchto meraní, aby sa minimalizovala chyba analógovo-digitálneho prevodníka.

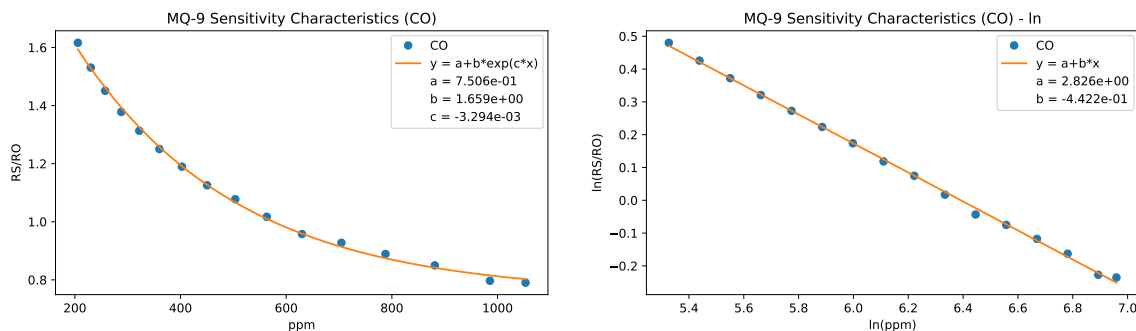
Po vyčítaní hodnôt z pôvodného diagramu v datasheete senzoru je potrebné pripraviť funkcie na získavanie reálnej koncentrácie plynov. Pokiaľ hodnoty jednotlivých plynov zobrazíme bez logaritmickej stupnice, je zrejme, že ich usporiadanie pripomína graf

exponenciálnej funkcie (Obr. 4.2 vľavo). Je teda možné ich aproximovať funkciou v tvare $y = a + b * e^{c*x}$ kde y je nameraná hodnota $\frac{R_s}{R_o}$ a x je koncentrácia plynu v ppm. Keďže hodnotu $\frac{R_s}{R_o}$ je podstatné si vyjadriť funkciu pre koncentráciu plynu. Výsledná funkcia má tvar:

$$\text{Koncentrácia} = c * \ln \left(\frac{\frac{R_s}{R_o} - a}{b} \right)$$

Získanie konštant a, b a c pre túto funkciu je však pomerne zložitá a konštanty sú pomerne malé s veľkým desatinným rozvojom. Keďže hodnoty $\frac{R_s}{R_o}$ a koncentrácie plynov sú vždy kladné čísla, je možné na nich aplikovať funkciu logaritmus. Po aplikovaní tejto sa hodnoty získané z pôvodného grafu zoradia tak, že ich je možné aproximovať jednoduchou lineárnou funkciou v tvare $y = a + b * x$, kde y je hodnota $\frac{R_s}{R_o}$ a x je koncentrácia plynu (Obr. 4.2 vpravo). Táto funkcia sa jednoduchšie aproximuje a výsledné konštanty sú presnejšie. Po prevedení bude výsledná funkcia pre koncentráciu v tvare:

$$\text{Koncentrácia} = \exp \left(\frac{\ln \left(\frac{R_s}{R_o} \right) - a}{b} \right)$$



Obr. 4.2: (*MQ-2*) Závislosť $\frac{R_s}{R_o}$ na koncentrácií *CO* (vľavo), po aplikácii \ln (vpravo).

Keďže z prehľadu technológií v prvej kapitoly je známe, že polovodičové senzory sú náchylné na zmenu teploty a vlhkosti vzduchu, je potrebné nameranú hodnotu upraviť na základe týchto veličín. Dáta o zmene hodnoty $\frac{R_s}{R_o}$ pri zmene teploty a rôznych vlhkostiach vzduchu sú zobrazené na Obr. 4.1 vpravo. Tieto dáta boli získané tak, že bola použitá koncentrácia plynu, kde pri podmienkach z grafu vľavo je hodnota $\frac{R_s}{R_o} = 1$. Takto vieme z tohto grafu pripraviť hodnotu R , ktorou budeme násobiť získané $\frac{R_s}{R_o}$, aby zodpovedalo aktuálnym podmienkam. Pri preskúmaní hodnôt získaných z tohto grafu môžeme vysloviť tieto tvrdenia:

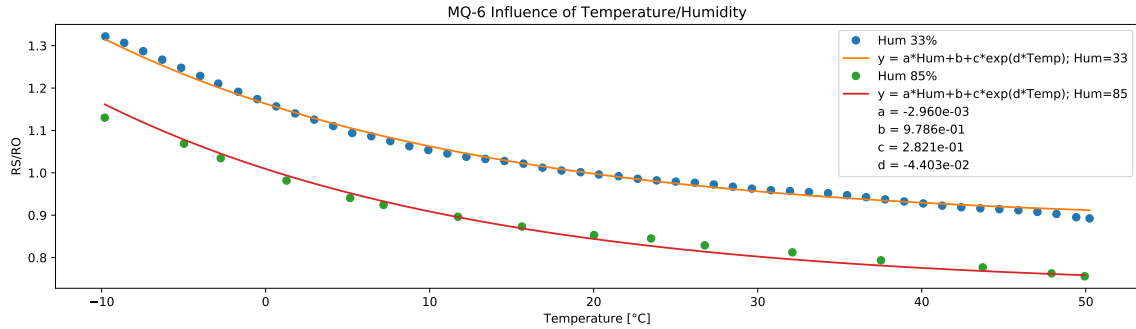
1. Tvar kriviek pre rôzne vlhkosti vzduchu je veľmi podobný.
2. Krivky majú tvar podobný exponenciálnej (*MQ-2*, *MQ-6*) alebo lineárnej funkcii (*MQ-9*).
3. Keďže ide o zobrazenie závislosti $\frac{R_s}{R_o}$ na teplote, je možné povedať, že nezávisle premennou x bude práve teplota.
4. Pri aplikácii tvrdenia č. 1 je možné povedať, že vlhkosť vzduchu ovplyvňuje posunutie po osy y .

Pomocou týchto tvrdení je následne možné zostaviť funkciu pre vyjadrenie hodnotu R ako:

$$R = a * \text{Vlhkosť} + b + e^{c * \text{Teplota}} \quad (MQ-2, MQ-6)$$

$$R = a * \text{Vlhkosť} + b + c * \text{Teplota} \quad (MQ-9)$$

Po aplikovaní a aproximovaní týchto funkcií na hodnoty z datasheetu dostaneme funkcie zobrazené na Obr. 4.3.



Obr. 4.3: (MQ-6) Závislosť $\frac{R_s}{R_o}$ na teplote pri rôznych vlhkostiach vzduchu.

Kompletné grafy pre všetky senzory, jednotlivé plyny a závislosti na teplote a vlhkosti vzduchu je možné nájsť v prílohách (A.3, A.4, A.5).

4.2 Server

Implementácia programu pre server sa skladá z dvoch častí *MQTT* klienta pre komunikáciu s brokerom a *HTTP* server pre zobrazovanie webovej aplikácie.

Ako databázový systém je použitý *SQLite*. Tento systém nie je na báze klient-server, ale slúži na ukladanie dát pre koncový bod.

MQTT klient

MQTT klient, ktorý je integrovaný v serverovej aplikácii, je prihlásený na odoberanie tém pre všetky merané veličiny a dym. V prípade, že príde správa z jednej z meraných veličín, uloží daný údaj do databázy s aktuálnym časom a dátumom. Pri obdržaní novej hodnoty je nastavený príznak pre danú veličinu, aby *HTTP* server mohol aktualizovať zobrazované dáta. Ďalej tento klient poskytuje možnosť pre *HTTP* server publikovať správy na požiadavku o meranie do témy určenej pre jednotku na získavanie dát.

HTTP server

Táto časť implementácie serverovej aplikácie zobrazuje výsledky zapísané do databázy. Pri spustení a pri každej požiadavke na odoslanie dát pre webovú aplikáciu skontroluje aktuálnosť žiadaných komponentov. V prípade, že komponent pre nejakú veličinu má nastavený príznak nových dát, vytiahne z databázy údaje o danej veličine a vygeneruje pre tento komponent nový *HTML* súbor. Následne žiadané komponenty odošle aplikácii. Všetky komponenty sú uložené a do webovej aplikácie odosielané samostane, aby nebolo nutné pri zmene jedného údaju aktualizovať stále celú stránku. Ak je požiadané o komponent (súbor), ktorý server nepozná, je vždy navrátená hlavná stránka (*index.html*).

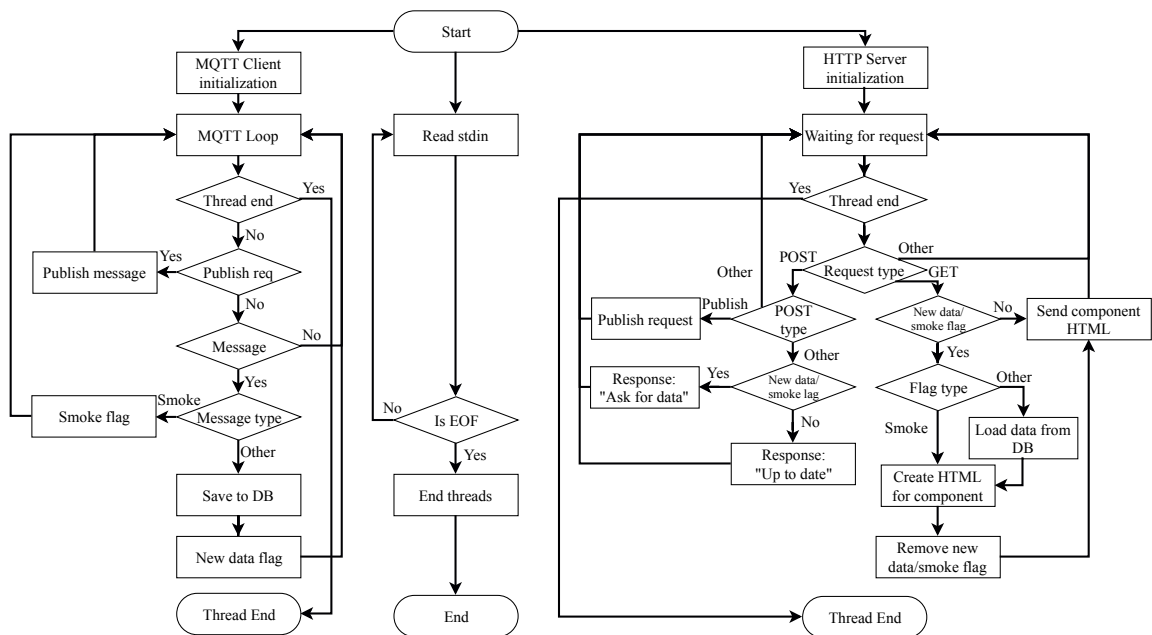
Webová aplikácia na zobrazovanie sa po načítaní periodicky pýta servera na aktualizáciu dát. Pokiaľ nastala zmena v niektorej z veličín, server do odpovede pre aplikáciu nastaví príznak pre komponent, ktorý sa zmenil. Aplikácia si následne zažiada o novú verziu zmeneného komponentu. Implementáciu webovej aplikácie je možné vidieť na Obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Implementácia webovej aplikácie.

Popis činnosti servera

Aby bolo možné používať obidva vyššie popísané komponenty serverovej aplikácie, je potrebné k nim pridať kontrolný program. Hlavný program spustí tieto komponenty v samostatných vláknoch, aby bolo možné používať ich simultánne. Vývojový diagram pre túto implementáciu je možné vidieť na Obrázku 4.5 alebo v prílohách (A.6).



Obr. 4.5: Vývojový diagram pre serverovú aplikáciu.

4.3 MQTT komunikácia

Kvôli bezpečnosti komunikácie nie je možné sa k brokeru pripojiť inak ako podpísanými klientskými certifikátmi. V systéme je používaných niekoľko tém: zachytenie dymu, teplota, vlhkosť vzduchu, požiadavky na konkrétne merania a samostatné témy pre každý z meraných plynov. Jednotka na získavanie dát odoberá tému na požiadavky pre konkrétne merania a publikuje správy do všetkých ostatných tém. Pri serverovej aplikácii je to presne naopak.

Správy publikované do témy na požiadavky pre konkrétne merania sú v tvare `get-NAME` kde `NAME` je meno veličiny, o ktorej meranie má server záujem. Neznáme veličiny alebo správy v zlom formáte sú zariadením ignorované. Do tém pre jednotlivé merané veličiny je ako správa publikovaná vždy iba ich hodnota. Pri téme na detekciu dymu sú správy prázdne a je nastavená *QoS 2*.

Ako *MQTT* broker je použitý program *Eclipse MosquittoTM*. Ide o najbežnejšie používaný *open-source* broker. Implementácia je pripravená tak, že je možné ju jednoducho zmenou adresy brokera a klientských certifikátov presunúť na robustnú platformu ako *AWS IoT*.

4.4 Zhrnutie

V tejto kapitole bola opísaná implementácia jednotlivých častí navrhovaného systému a problémy, ktoré pri tom vznikli.

Jednotka na získavanie údajov má všetky kritické časti implementované ako prerušenia. Detekcia dymu reaguje na nástupnú hranu signálu senzoru. Periodické posielanie údajov na server je vyvolávané prerušením od časovača. Všetky merania sú vykonávané až v hlavnom cykle programu, aby bola zabezpečená rýchlosť spracovania prerušenia. Hodnota meraná senzormi na detekciu plynov je opravená podľa aktuálnej teploty a vlhkosti vzduchu.

Serverová časť je implementovaná v dvoch častiach *MQTT* klient a *HTTP* server. *MQTT* klient odoberá všetky témy pre merané veličiny a prijaté hodnoty ukladá do *SQLite* databázy. Pri prijatí nových hodnôt nastaví pre *HTTP* server príznak nových dát alebo dymu. *HTTP* server posielá komponenty pre merané veličiny samostatne, aby bolo zamedzené zbytočnému posielaniu dát. Webová aplikácia sa periodicky pýta servera, či nenastala zmena v nejakej časti, v prípade zmeny si opýta zmenený komponent. Je cez ňu možné požiadať o nové meranie pomocou publikovania do témy na požiadavky na konkrétne meranie.

Ako *MQTT* broker je použitá aplikácia *Eclipse MosquittoTM*. Klienti sa pripájajú na broker pomocou podpísaných certifikátov.

Kapitola 5

Experimenty

Pre potvrdenie funkčnosti systému je v tejto kapitole uvedených niekoľko experimentov. Tieto experimenty boli vykonané so zameraním na kľúčové vlastnosti systému. Sú to experimenty na správnu a falošnú detekciu dymu, detekciu a meranie koncentrácie oxidu uhoľnatého a zemného plynu.

5.1 Detekcia dymu

Skorá detekcia dymu patrí k najpodstatnejším častiam protipožiarnej ochrany, preto je tento experiment navrhnutý tak, aby bolo možné overiť, že zariadenie je schopné správne detekovať dym.

Popis experimentu

Keďže najpodstatnejšie je zachytiť dym v jeho počiatkovej fáze, fáze rozkladu bez ohňa, je potrebné nasimulovať podmienky takéhoto požiaru. V tejto fáze dochádza k zohrievaniu materiálu bez ohňa, pričom vzniká dym.

Pri experimente je použité horúce teleso, na ktoré sú poukladané látky bežne sa vyskytujúce v interiéri. Ako horúce teleso je použité kokosové uhlie. Kokosové uhlie po zapálení začína tlieť pri teplote približne 450 °C, vzduch v tesnej blízkosti nad ním má teplotu približne 135 °C. Pri tomto tomto pokuse je použitý jeden uhlík o rozmeroch 2.3 × 2.3 × 2.3 cm.

Ako horiace látky sú použité materiály bežne sa vyskytujúce v domácnosti - drevo, papier a tabakové listy do vodnej fajky. Bolo by vhodné vyskúšať aj ďalšie materiály ako polyuretánová pena a PVC. Avšak vzhľadom na jedovatosť plynov vznikajúcich pri ich horení je ich testovanie pri týchto podmienkach nemožné.

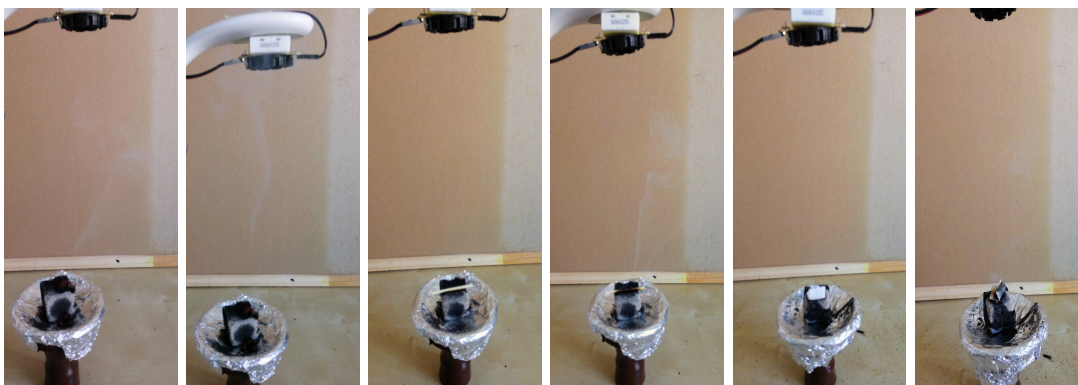
Experiment prebieha v bežnej bytovej izbe o rozmeroch 3.5 × 5.2 m a výške 3 m. Rozžeravený materiál je položený na nehorľavej podložke na zemi, senzor je umiestnený 30 cm nad zdrojom dymu.

Priebeh experimentu

Materiály sú postupne ukladané na rozžeravené teleso, následne je pozorované či sa tvorí viditeľný dym a či nastane detekcia dymu senzorom.

Prvým testovaným materiálom boli tabakové listy do vodnej fajky. Pri ich horení sa najprv postupne vyparovala tekutina, v ktorej sú tieto listy namočené. Na tento dym nena-

stala žiadna reakcia. Senzor zachytil dym krátko po ščernaní tabakových listov. Pri testovaní dreva a papiera senzor reagoval už pri prvých známkach dymu. Stav experimentu pred a pri zachytení dymu je možné vidieť na Obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Stav horenia materiálu na začiatku pokusu a v dobe zachytenia dymu.
Z ľava: tabakové listy, drevo, papier.

Vyhodnotenie experimentu

Experiment potvrdil, že zariadenie je schopné včasne detekovať dym. Senzor zareagoval okamžite po tom čo sa dostal do priameho kontaktu s dymom pri horení všetkých testovaných materiálov s výnimkou tabakových listov do vodnej fajky, kde reagoval až po vyparení sa obalovej tekutiny.

5.2 Falošná detekcia

Spôľahlivosť detekcie senzoru na reálny poplach bola otestovaná experimentom č. 1. Pri senzoroch na detekciu dymu je ale podstatné, aby reagovali iba na reálny poplach. Tento experiment sa zameriava na vyvolanie falošného poplachu senzoru.

Popis experimentu

Pre účely tohto experimentu bolo potrebné otestovať objekty bežne produkujúce dym v domácnosti. Pri tomto experimente boli použité: sviečka, výpary pri varení, cigaretový dym a dym z elektronických cigariet.

Pri testovaní dymu zo sviečky je testovaná detekcia pri zapaľovaní sviečky plynovým zapaľovačom, pri samotnom horení sviečky a dymu vznikajúceho pri zhasnutí sviečky. Výpary pri varení sú konkrétne výpary pri samotnom varení jedla, kde je prítomná vodná para a výpary alkoholu. Pri týchto experimentoch je senzor umiestnený 30 cm nad zdrojom dymu. Pri testovaní cigaretového dymu sú použité bežné cigarety. Dym z elektronickej cigarety je produkovaný bežnou elektronicou cigaretou. Dym je vydýchnutý pod senzor.

Priebeh experimentu

Vyvolať falošný alarm na dym produkovaný horením sviečky sa podarilo iba v prípade, že IR žiarenie produkované plameňom dopadalo na senzor. Dym vznikajúci pri zapaľovaní a

dym vznikajúci po zhasnutí sviečky nevyvolal falošný poplach ani ak bol senzor umiestnený priamo do tohto dymu. Priebeh experimentu je možné vidieť na Obrázku 5.2.



Obr. 5.2: Detekcia dymu zo sviečky počas horenia (vľavo) a po jej zhasnutí (vpravo).

Pri výparoch z varenia senzor vyvolal falošný poplach len pokiaľ bol vložený priamo do pary. Ak bol senzor umiestnený aspoň 1 m nad zdroj, nebol vyvolaný ani jeden falošný poplach.

Pri dyme z cigariet a elektronických cigariet sa nepodarilo vyvolať falošný poplach.

Vyhodnotenie experimentu

Pri experimentoch sa ukázalo, že zariadenie nereaguje na dym produkovaný žiadnym z testovaných objektov.

Aby bolo možné podložiť výsledky týchto experimentov, je nutné porovnať veľkosť častíc v dyme, ktorý produkujú dané objekty, s minimálnou detekčnou hranicou senzora. Ako je známe z prvej kapitoly, technológia, na ktorej je postavený senzor na detekciu dymu, dokáže detekovať častice v rozmedzí 4 do 10 μm .

Pri zapalovaní sviečky vzniká dym pozostávajúci z častíc o rozmeroch približne od 0,017 do 0,9 μm . Pri horení sviečky vzniká dym pozostávajúci z častíc o rozmeroch od 0,017 do 1,05 μm a pri uhasení sviečky vzniká dym pozostávajúci z častíc o rozmeroch od 0,017 do 1,7 μm [6]. Preto je tento dym pre senzor nedetekovateľný.

Cigaretový dym pri cigaretách s filtrom sa skladá hlavne z častíc menších ako 0,1 μm a iba zopár väčších ako 0,5 μm . Pri cigaretovom dyme bez filtru ide o častice od 0,2 do 0,32 μm [9]. Dym z oboch typov cigariet je taktiež pod minimálnym prahom na detekciu.

5.3 Detekcia oxidu uhoľnatého

Ako bolo uvedené v prvej kapitole, najnebezpečnejší plyn vznikajúci pri požiari je oxid uhoľnatý. Na jeho detekciu a meranie jeho koncentrácie vo vzduchu je zameraný nasledujúci experiment. Experiment bol vykonaný v spolupráci s Fakultou chemickou (prof. Ing. Tomáš Svěrák, CSc.) a Fakultou strojného inžinierstva (Ing. Ondřej Křištof) VUT v Brne.

Popis experimentu

Pre postupné vytváranie oxidu uhoľnatého je v sklenenom utesnenom akváriu o rozmeroch 150 × 50 × 60 cm umiestnený na nehorľavej podložke kváder z *PET* (polyetylentereftalát)

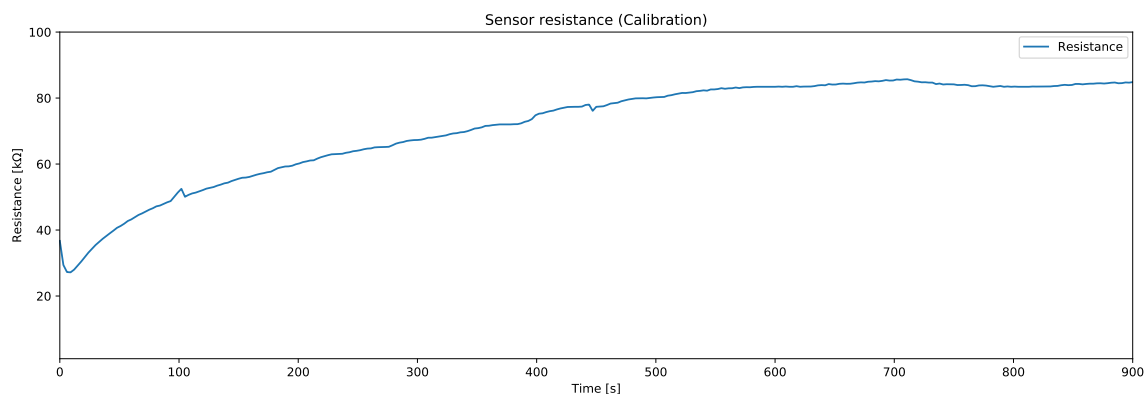
plastu. Do tohto kvádra je uložená spájkovačka, ktorá sa postupne rozohreje na $450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Keďže je obmedzený prístup kyslíka, začne sa produkovať oxid uhoľnatý. Sensory na meranie teploty, vlhkosti vzduchu a koncentrácie oxidu uhoľnatého sú umiestnené v protilahlom hornom rohu akvária. Pripravenú aparatúru na experiment je možné vidieť na Obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Aparatúra na vykonanie experimentu.

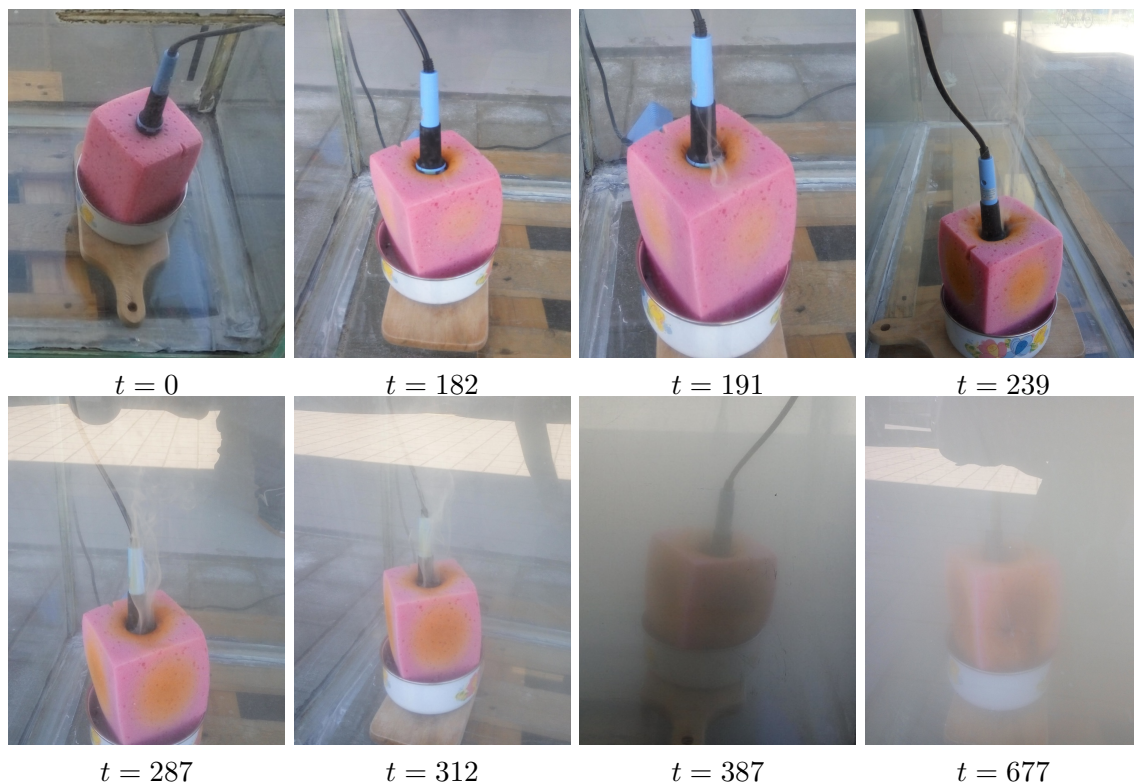
Priebeh experimentu

Pred začiatkom experimentu bolo potrebné senzor na detekciu oxidu uhoľnatého kalibrovať. Senzor bolo potrebné nechať rozohrievať až pokiaľ sa neustálil jeho odpor, následne sa z nameraného vypočítala hodnota odporu senzora v čistom vzduchu. Priebeh kalibrácie je možné vidieť na Obrázku 5.4.



Obr. 5.4: Kalibrácia senzora pred zahájením experimentu.

Po započatí experimentu nebolo prvé dve minúty nič spozorované. Po približne 3 minútach došlo k miernemu ščernaniu na materiáli v oblasti spájkovačky a po stranách na úrovni jej hrotu (Obr. 5.5 $t = 182$). Po ďalších približne 10s bolo možné spozorovať dym (Obr. 5.5 $t = 191$). Produkcia dymu následne rýchlo rástla a v priebehu ďalších 3 minút už nebolo možné kvôli dymu vidieť skrz akvárium (Obr. 5.5 $t = 239$ až $t = 387$). Do ukončenia experimentu bolo vidieť iba minimálne zvýšenie koncentrácie dymu (Obr. 5.5 $t = 677$).



Obr. 5.5: Priebeh horenia materiálu ($t[s]$: čas od začiatku experimentu).

Stav experimentu pred jeho ukončením je možné vidieť na Obrázku 5.6.



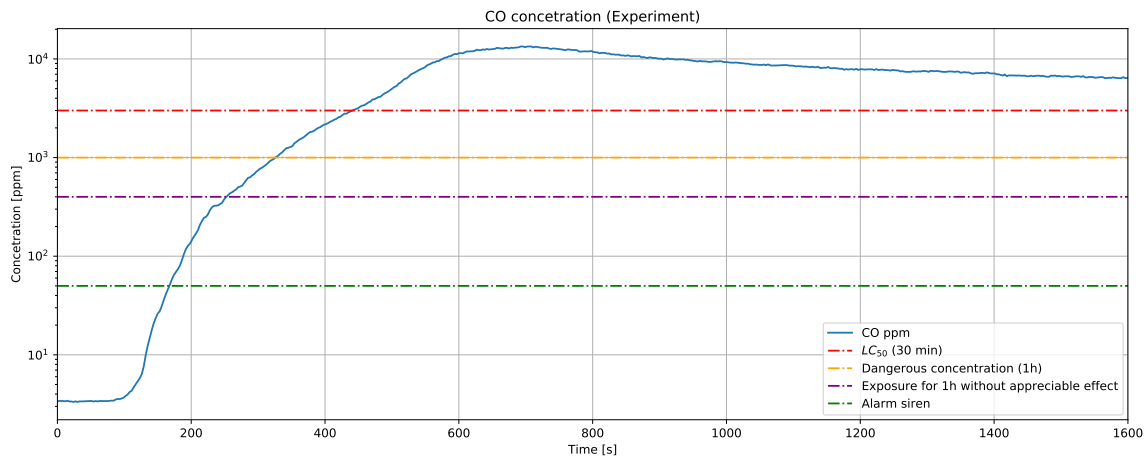
Obr. 5.6: Stav experimentu pred ukončením.

Vyhodnotenie experimentu

Po vyhodnení výsledkov experimentu sa ukázalo, že zariadenie je schopné detekovať a merať koncentráciu oxidu uhoľnatého. Nameraný priebeh zvyšovania koncentrácie oxidu uhoľnatého je možné vidieť na Obrázku 5.7.

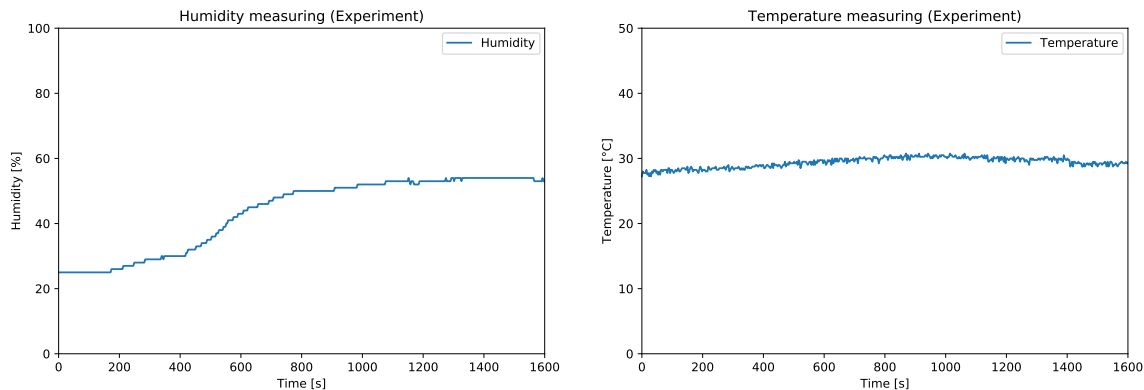
Pri experimente bolo možné sledovať prudký nárast koncentrácie oxidu uhoľnatého ešte pred vznikom akéhokoľvek dymu a to približne od 105-tej do 180-tej sekundy. Po spozorovaní prvého dymu pokračoval rýchly nárast koncentrácie až do $t = 660$. Koncentrácia, pri

ktorej sa spúšťajú prvé varovné alarmy (50 ppm) bola prekročená v 183 -tej sekunde. Maximálna koncentrácia, ktorej môže byť človek vystavený po dobu jednej hodiny bez vážnych následkov (400 ppm) bola dosiahnutá v 285-tej sekunde a LC_{50} (3000 ppm) bola prekročená v 486 -tej sekunde. Najväčšia koncentrácia bola dosiahnutá približne po 693 sekundách od začiatku experimentu a ostala blízko tejto hodnoty až do jeho ukončenia.



Obr. 5.7: Koncentrácia oxidu uhľnatého počas experimentu.

Ako bolo konštatované v predošlej kapitole, aby bolo možné správne vyhodnocovať výstup senzoru na detekciu oxidu uhľnatého, je potrebné merať aj teplotu a vlhkosť vzduchu. Výsledky týchto meraní je možné vidieť na Obrázku 5.8. Teplota sa pri experimente menila iba minimálne. Malé zmeny, ktoré je možné pozorovať, boli spôsobené nepresnosťou merania senzora. Vlhkosť vzduchu sa v priebehu experimentu menila výraznejšie, pretože pri horení PET plastov vzniká oxid uhličitý, oxid uhľnatý a voda.



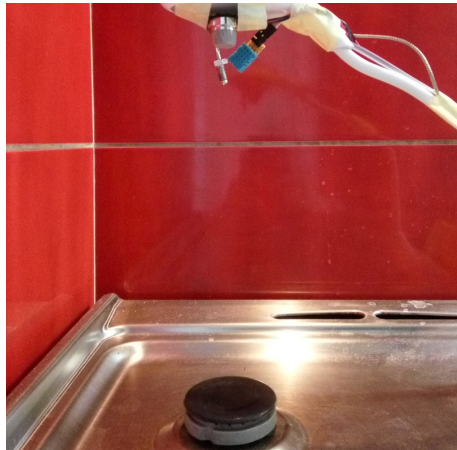
Obr. 5.8: Zmeny teploty (vľavo) a vlhkosti vzduchu (vpravo) počas experimentu.

5.4 Detekcia zemného plynu

Detekcia zemného plynu je jednou z funkcií navrhovaného zariadenia, preto bola otestovaná ďalším experimentom.

Popis experimentu

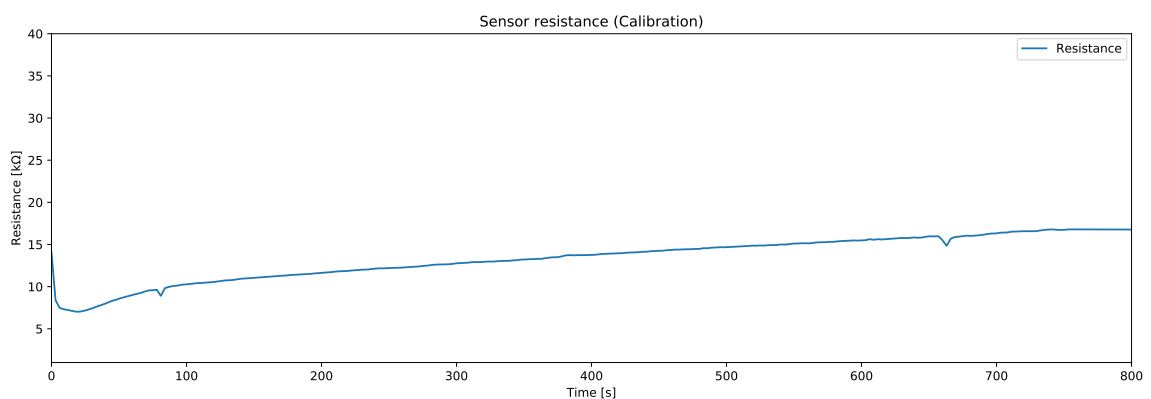
Senzor bol pri experimente umiestnený nad plynový sporák. Plynový sporák bol zapnutý a postupne boli uvoľňované malé dávky plynu, ktoré mal senzor detekovať. Kvôli bezpečnosti bol senzor umiestnený 15 cm nad zdrojom plynu. Pripravenú aparatúru je možné vidieť na Obrázku 5.9.



Obr. 5.9: Aparatúra na vykonanie experimentu.

Priebeh experimentu

Rovnako ako pri predchádzajúcom experimente, aj pri tomto meraní bolo potrebné najprv senzor kalibrovať. Priebeh zmeny odporu senzoru počas kalibrácie je možné vidieť na Obrázku 5.10.

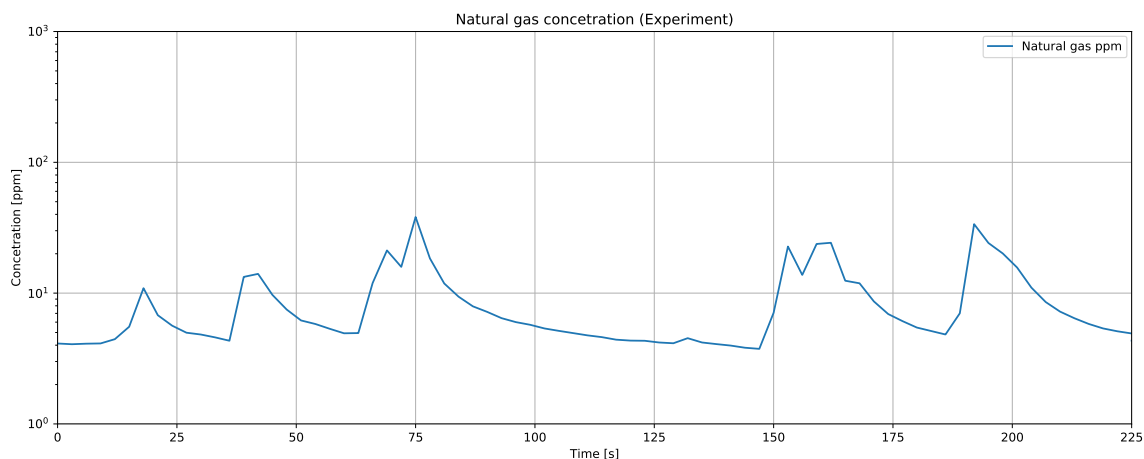


Obr. 5.10: Kalibrácia senzoru pred začatím experimentu.

Po ukončení kalibrácie boli postupne uvoľňované malé dávky zemného plynu. Kvôli bezpečnosti bol po každej dávke plyn rozptýlený vzduchom.

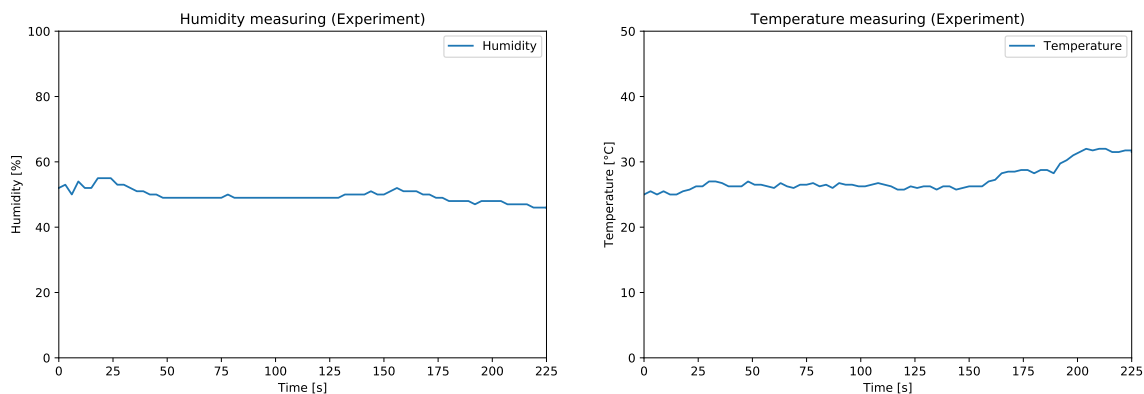
Vyhodnotenie experimentu

Experiment potvrdzuje, že zariadenie je schopné detekovať zemný plyn. Priebeh zmeny koncentrácie zemného plynu je možné vidieť na Obrázku 5.11. Keďže senzor nebol počas experimentu v uzavretom priestore bez pohybu vzduchu, je možné vidieť značné výkyvy v meraných hodnotách.



Obr. 5.11: Koncentrácia zemného plynu počas experimentu.

Teplota a vlhkosť vzduchu sa pri experimente menili iba minimálne (Obr. 5.12). Zmeny vo vlhkosti vzduchu boli dané iba nepresnosťou meraním senzora. Zmena teploty na konci experimentu bola vyvolaná čiastočným vzbĺknutím uvoľňovaného zemného plynu.



Obr. 5.12: Zmeny teploty (vľavo) a vlhkosti vzduchu (vpravo) počas experimentu.

5.5 Zhrnutie

Z výsledkov experimentov číslo 1 a 2 je možné konštatovať, že zariadenie detekuje dym s minimálnym množstvom falošných detekcií. Experimenty číslo 3 a 4 potvrdili, že zariadenie dokáže detekovať a merať koncentráciu oxidu uhoľnatého a zemného plynu.

Kapitola 6

Záver

V rámci tejto práce vzniklo zariadenie na detekciu dymu, zemného plynu a nebezpečných plynov vznikajúcich pri požiari v interiéri, ktoré je možné využiť ako prvok protipožiarnej ochrany v domácnostiach alebo priemyselných priestoroch. Jeho prednosťou je včasná detekcia dymu, schopnosť merania koncentrácie najbežnejších nebezpečných plynov horenia a zároveň odosielanie nameraných údajov v reálnom čase cez *Wi-Fi*.

Zariadenie je postavené na mikrokontroléri *ESP32*. Na detekciu dymu bol navrhnutý senzor využívajúci bodovú fotoelektrickú metódu, ktorá je v súčasnosti hodnotená ako optimálna na detekciu požiarov v interiéri. Zariadenie meria koncentráciu oxidu uhoľnatého, zemného plynu a LPG. Zároveň meria teplotu a vlhkosť vzduchu. Namerané údaje odosiela prostredníctvom protokolu *MQTT*.

Ďalší prvok, ktorý vznikol v tejto práci, je serverová aplikácia na ukladanie a vizualizáciu dát. Aplikácia sa pripája na *MQTT* sieť, kde sníma hodnoty namerané zariadením. Tieto hodnoty následne ukladá do *SQLite* databázy. Pre vizualizáciu dát obsahuje webovú aplikáciu, v ktorej má užívateľ možnosť vidieť vizualizované hodnoty jednotlivých veličín a požiadať zariadenie o nové merania ktorejkoľvek veličiny. Dáta zobrazované webovou aplikáciou sú vždy aktuálne a pri zmene je aktualizovaný iba konkrétny prvok.

Funkčnosť zariadenia bola potvrdená v experimentoch, ktoré sú uvedené v závere práce. Z ich vyhodnotenia vyplýva, že zariadenie je schopné detekovať dym s minimálnym množstvom falošných detekcií. Rovnako bola v experimentoch potvrdená schopnosť detekovať a merať koncentráciu oxidu uhoľnatého a zemného plynu.

Pri prípadnom rozšírení uvedenej práce sa ponúka možnosť pridania ďalších senzorov na meranie koncentrácie iných nebezpečných plynov ako aj možnosť zníženia spotreby zariadenia tak, aby mohlo byť napájané batériou.

Literatúra

- [1] Ahrens, M.: *Smoke Alarms in U.S. Home Fires*. Zář 2015.
- [2] Alarifi, A.; Phylaktou, H.; Andrews, G.: What Kills People in a Fire? Heat or Smoke? *9th SSC Proceedings*, January 2016.
URL <http://eprints.whiterose.ac.uk/96795/>
- [3] Demirbas, A.: *Methane Gas Hydrate*. Springer-Verlag London, 2010, ISBN 978-1-84882-871-1.
- [4] Dudáček, A.: *Automatická detekce požáru*. Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008, ISBN 978-80-7385-060-9.
- [5] Dvořák, O.; Charvátová, V.; Růžicka, M.: *Nebezpečí toxicity zplodin hoření materiálů*. Ministerstvo vnitra - generální ředitelství Hasičského záchranného sboru ČR, 2007, ISBN 978-80-86640-92-1.
- [6] Fine, P. M.; Cass, G. R.; Simoneit, B. R. T.: Characterization of Fine Particle Emissions from Burning Church Candles. *Environmental Science & Technology*, ročník 33, č. 14, 1999: s. 2352–2362, doi:10.1021/es981039v.
URL <https://doi.org/10.1021/es981039v>
- [7] Jakirschner: *Surface Acoustic Wave Sensor Interdigitated Transducer Diagram*. Prosinec 2010, [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_acoustic_wave_sensor
- [8] Kadlec, K.: *Katalytické senzory a jejich aplikace v analýze plynů*. 2011.
URL <https://kuhv.vscht.cz/files/uzel/0017043/Katalytick%C3%A9%20senzory.pdf?redirected>
- [9] Keith, C. H.: Particle Size Studies on Tobacco Smoke. *Beiträge zur Tabakforschung / Contributions to Tobacco Research*, ročník 11(3), 1982: str. 123–131, doi:10.2478/cttr-2013-0506.
URL <https://doi.org/10.2478/cttr-2013-0506>
- [10] McKenna, S. T.; Hull, T. R.: The fire toxicity of polyurethane foams. *Fire Science Reviews*, ročník 5, č. 1, Apr 2016: str. 3, ISSN 2193-0414, doi:10.1186/s40038-016-0012-3.
URL <https://doi.org/10.1186/s40038-016-0012-3>
- [11] Mohankumar, D.: *Gas Sensors. How Stuff Works*. Listopad 2012, [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL <https://dmohankumar.wordpress.com/2012/11/17/how-stuff-works-gas-sensors/>

- [12] Sebastian, S.: *Which Smoke Alarm Technology is recommended for the City of South Euclid: Ionization v. Photoelectric*. Únor 2015.
- [13] SGX Sensortech (IS) Ltd: *Introduction to Gas Sensing Using Non-Dispersive Infrared (NDIR)*. Říjen 2014, [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=544>
- [14] SGX Sensortech (IS) Ltd: *Using Electrochemical Gas Sensors for Detection of Carbon Monoxide / Hydrogen Sulfide*. Březen 2015, [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=584>
- [15] Sumi, K.; Tsuchiya, Y.: *Toxic Gases and Vapours Produced at Fires*. Prosinec 1971, [Online; navštíveno 20.11.2017].
URL http://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd144_e.html
- [16] Systech Instruments Ltd (UK): *Thermal Conductivity*. [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL <https://www.systechillinois.com/ru/support/technologies/thermal-conductivity-analyzers>
- [17] TASHIKA JAPAN: *Gas Sensors: Operating principle*. 2010, [Online; navštíveno 05.01.2018].
URL http://www.tashika.co.jp/products/environmental/gas_sensors/operating_principle.html
- [18] Yunusa, Z.; Hamidon, M. N.; Kaiser, A.; aj.: *Gas Sensors: A Review*. Duben 2014.

Prílohy

Zoznam príloh

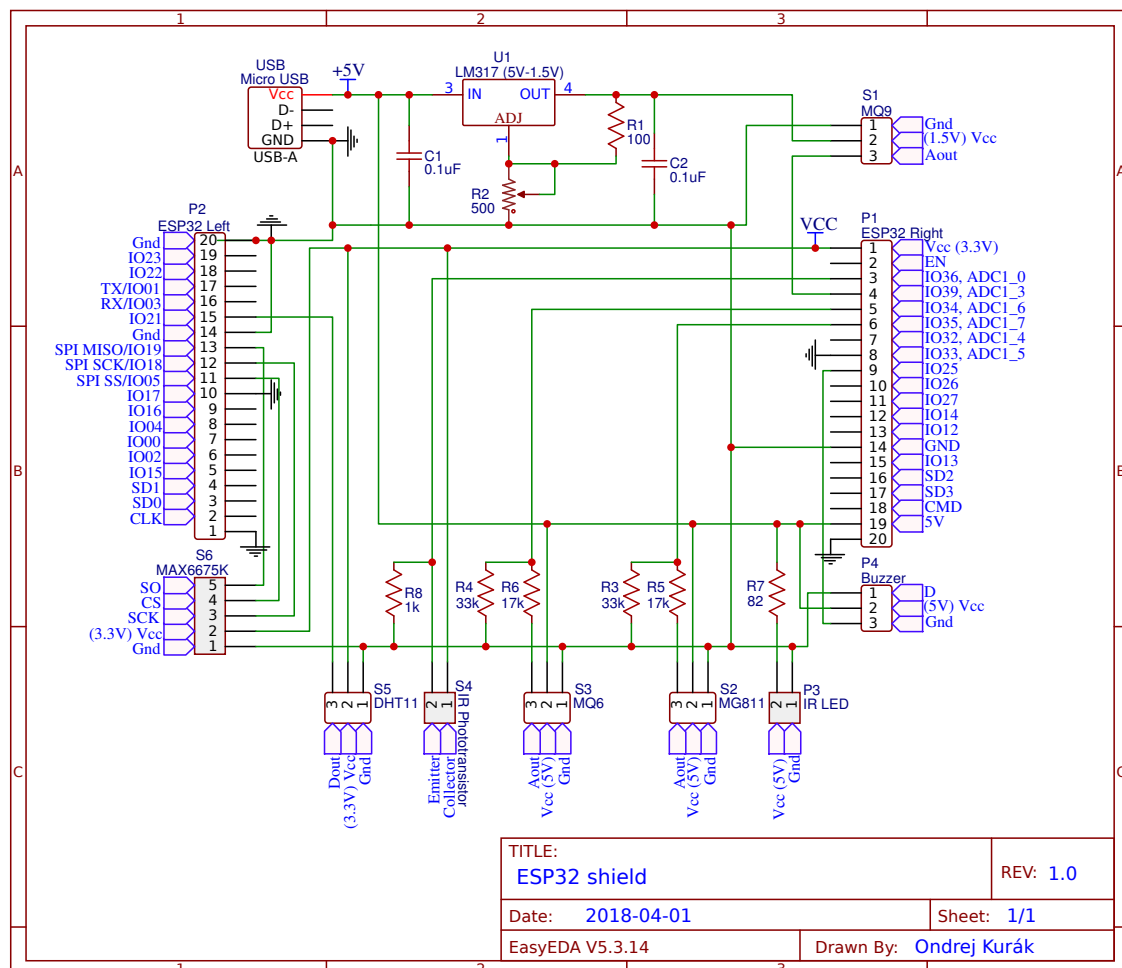
A	Obrázky	43
A.1	Konektorový shield	43
A.2	Fotoelektrický senzor dymu	45
A.3	MQ-2 charakteristiky a odvodené krivky	45
A.4	MQ-6 charakteristiky a odvodené krivky	48
A.5	MQ-9 charakteristiky a odvodené krivky	50
A.6	Vývojový diagram pre serverovú aplikáciu	52

Príloha A

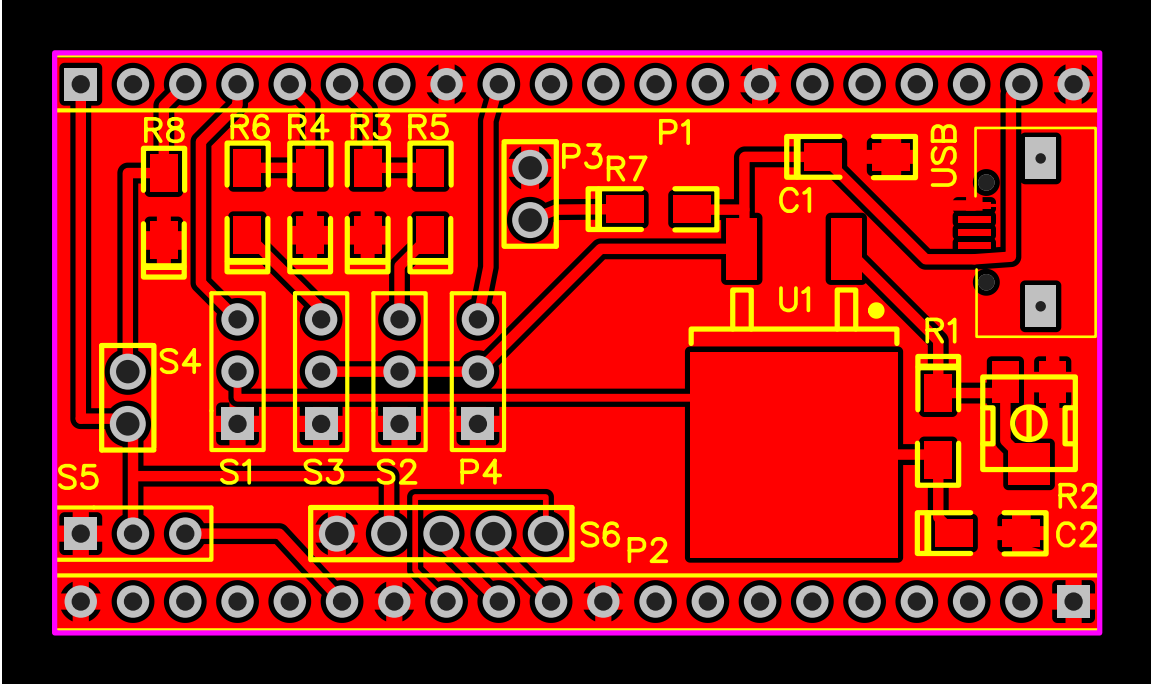
Obrázky

A.1 Konektorový shield

Schéma zapojenia

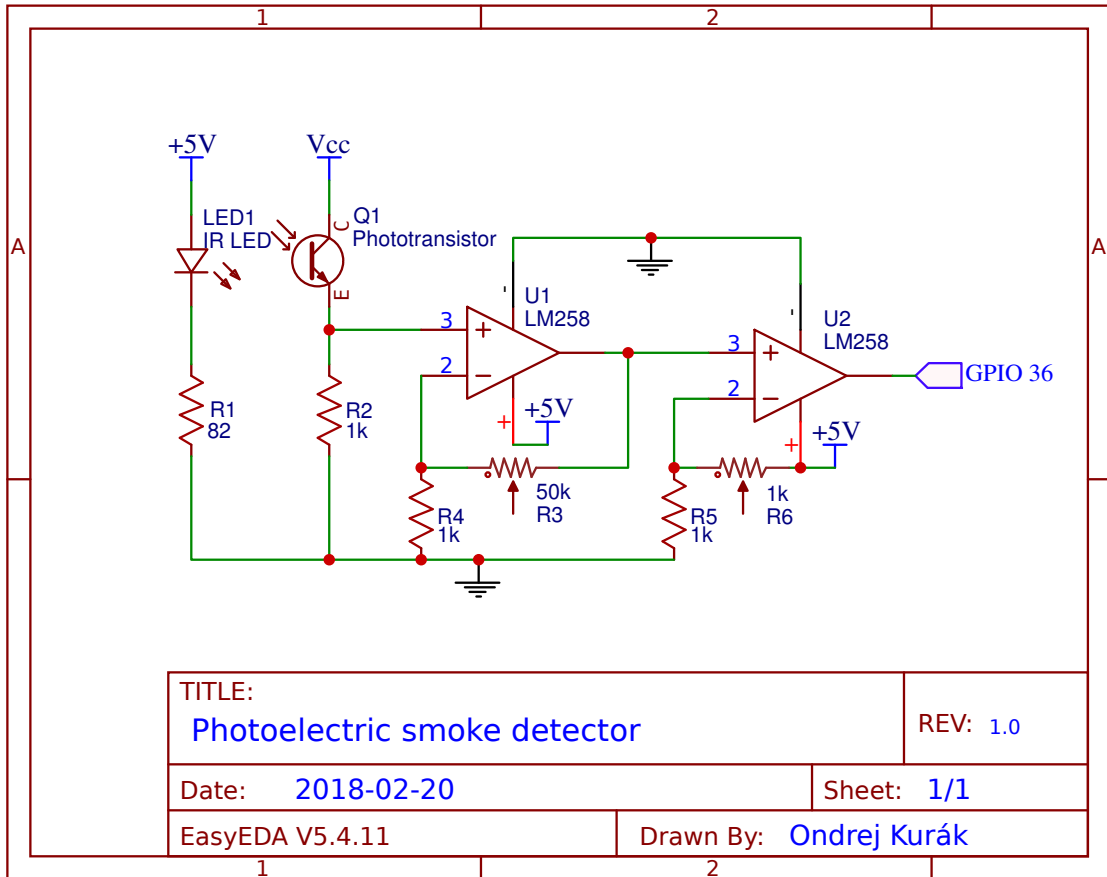


Doska plošných spojov

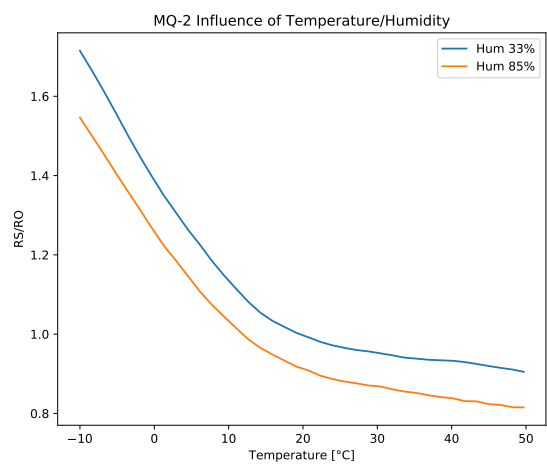
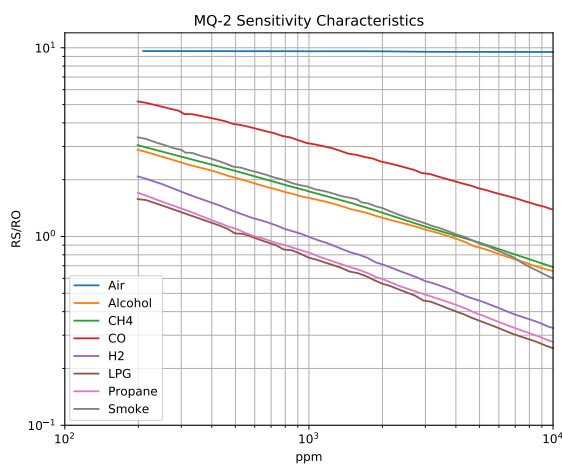


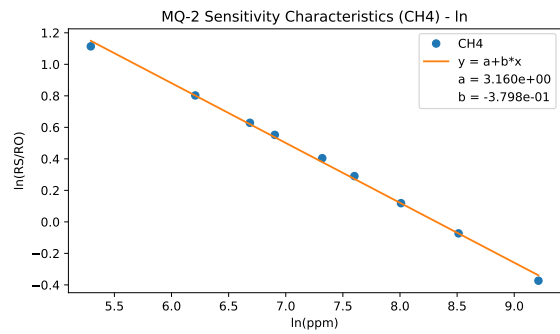
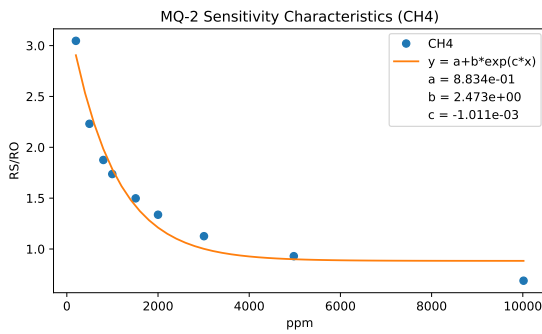
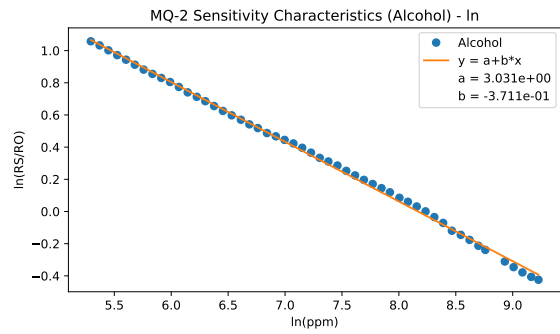
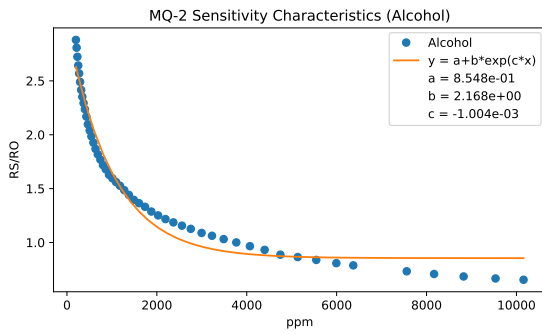
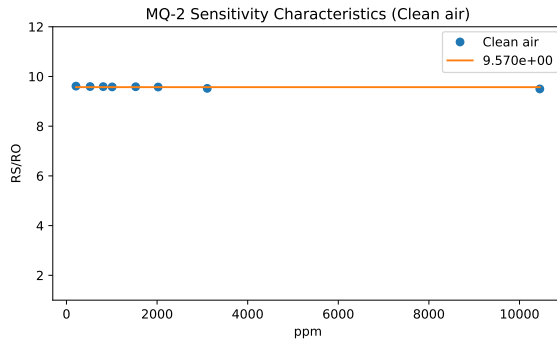
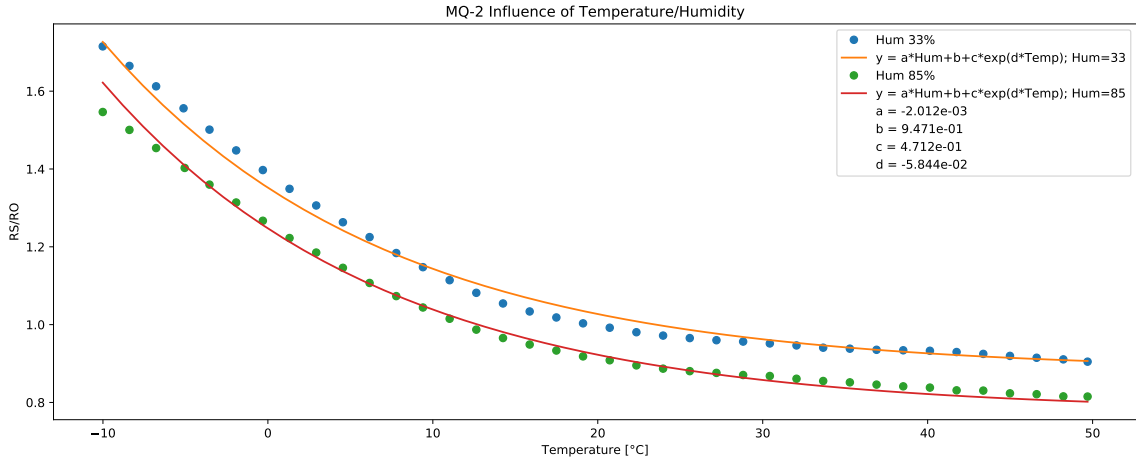
A.2 Fotoelektrický senzor dymu

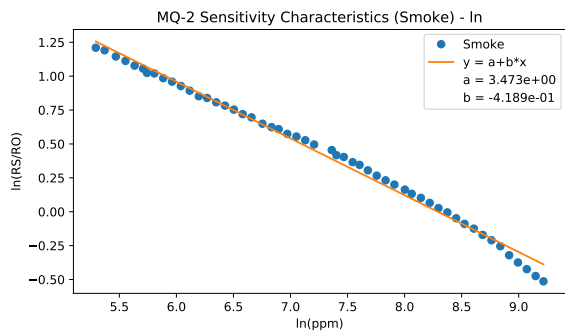
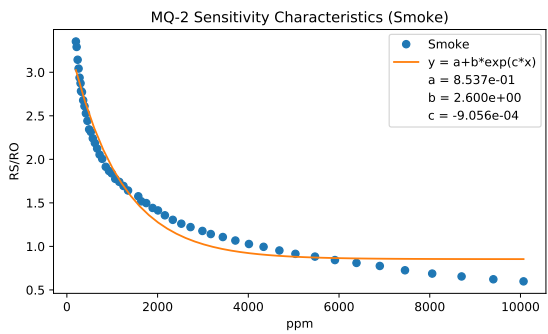
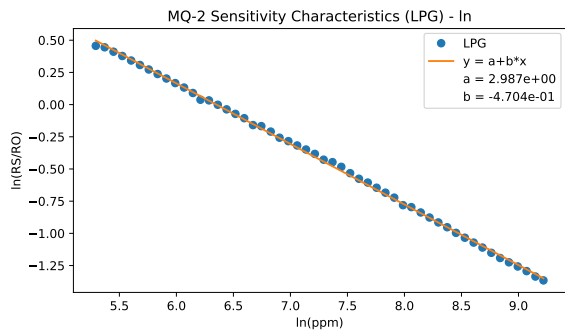
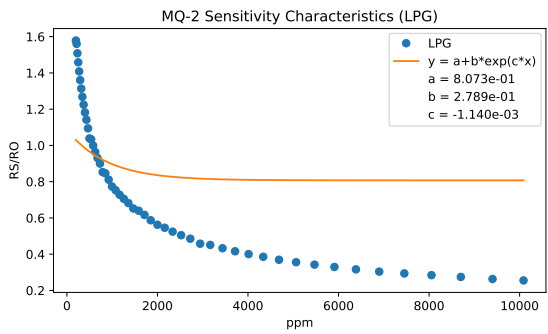
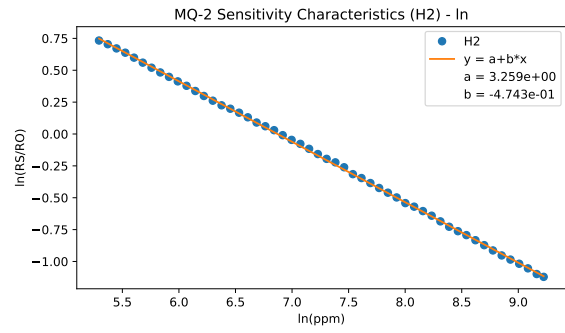
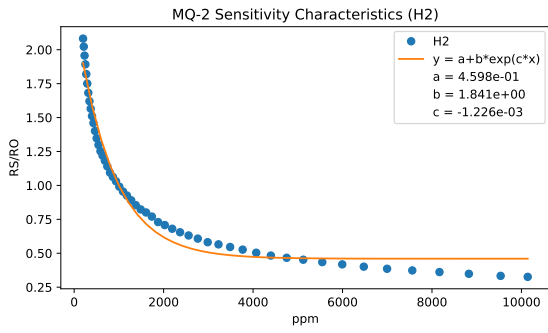
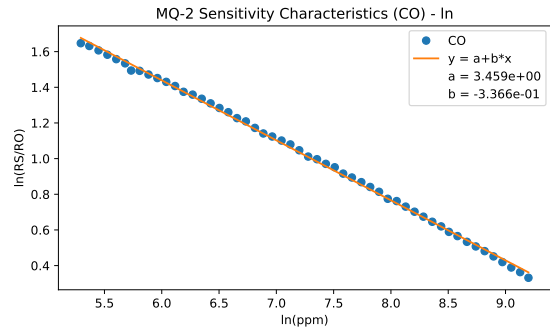
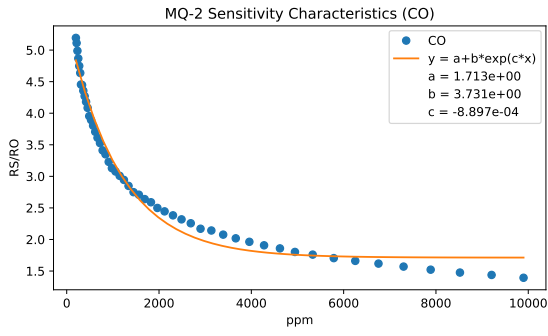
Schéma zapojenia

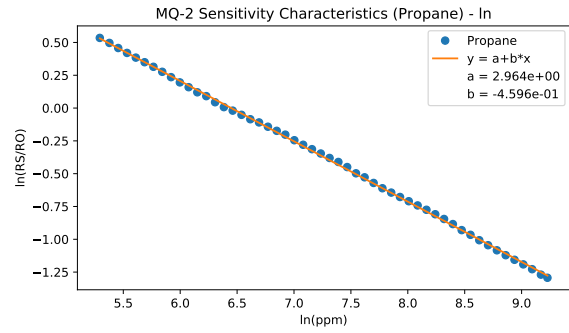
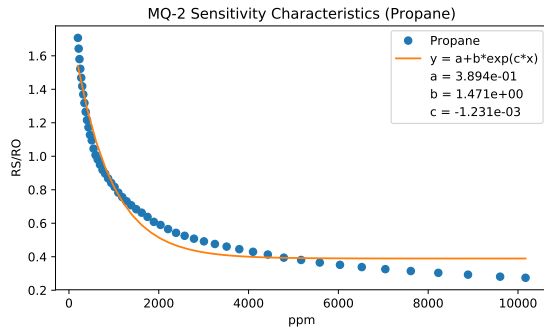


A.3 MQ-2 charakteristiky a odvodené krivky

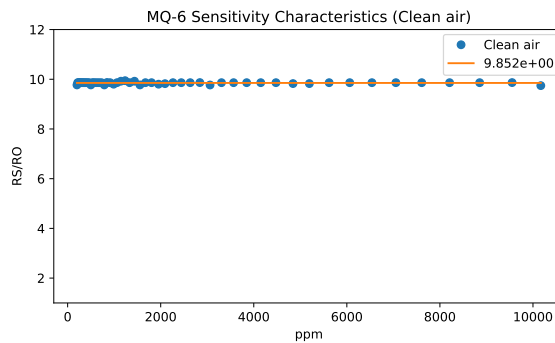
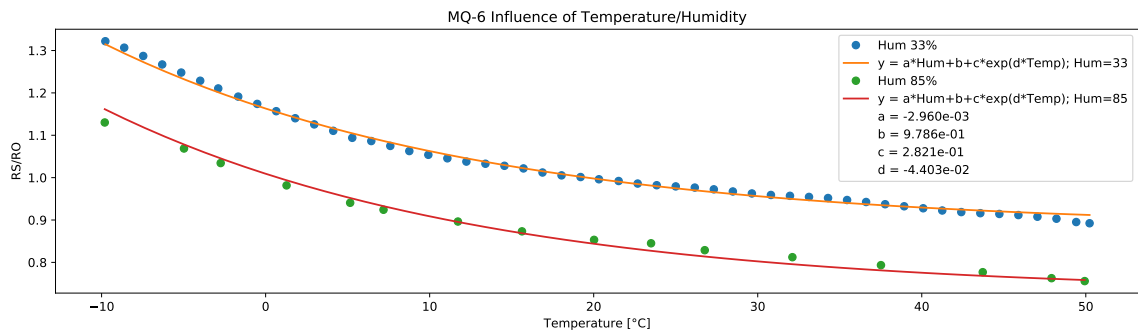
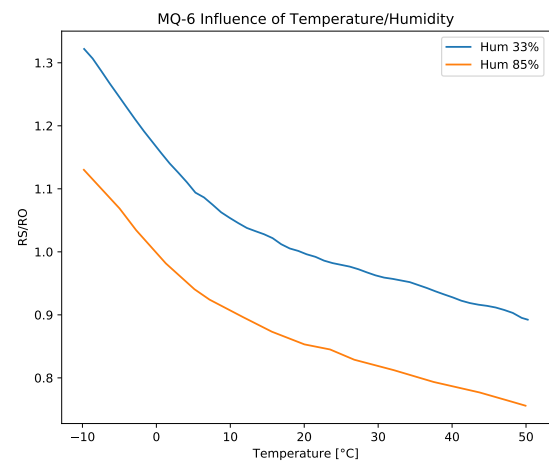
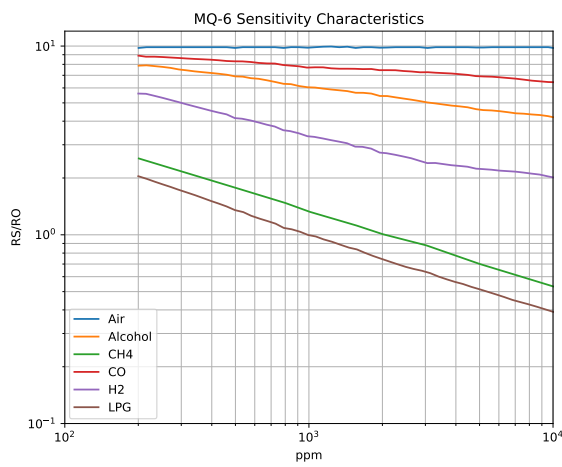


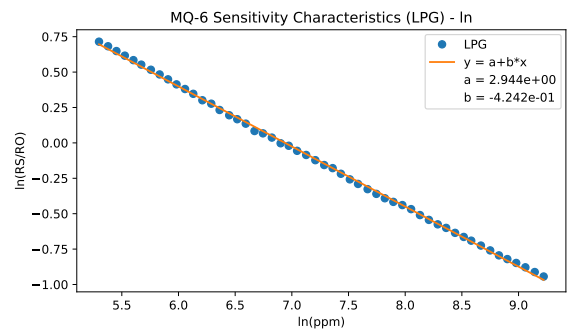
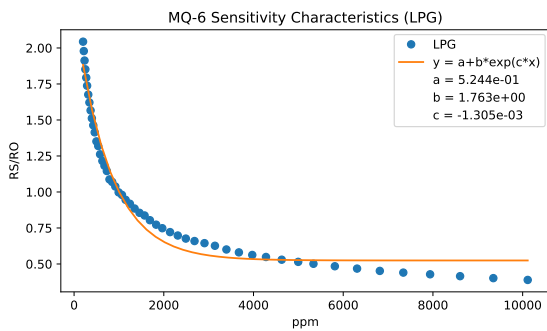
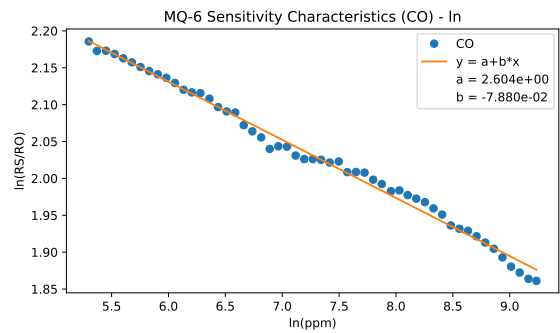
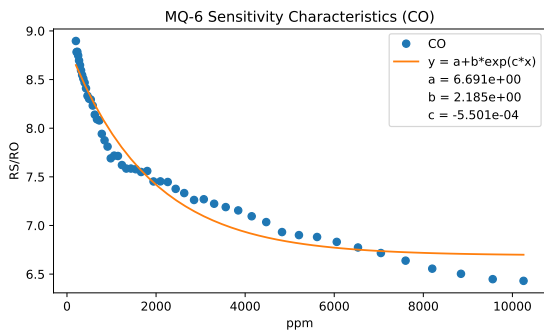
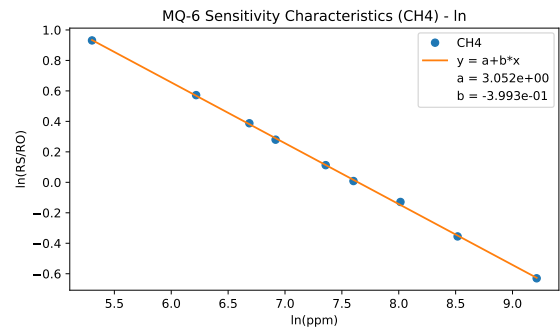
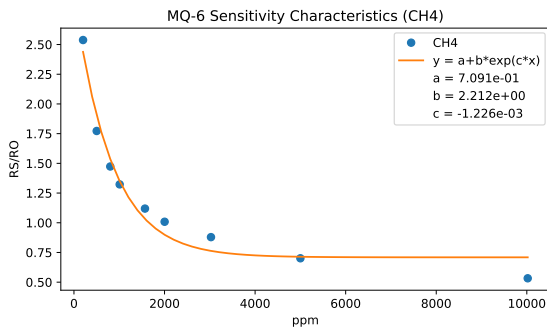
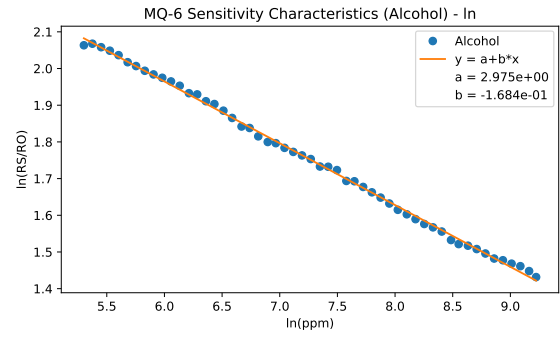
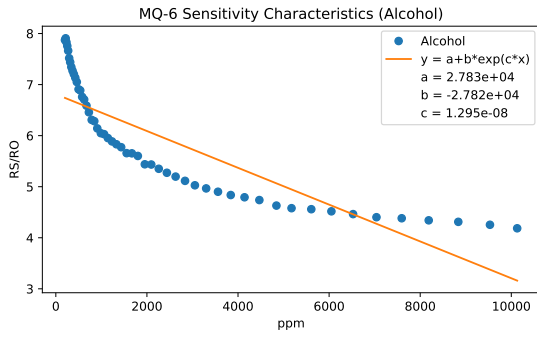


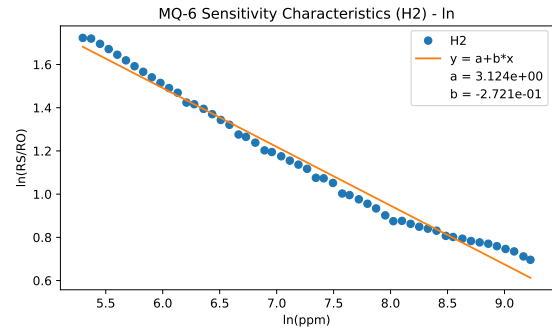
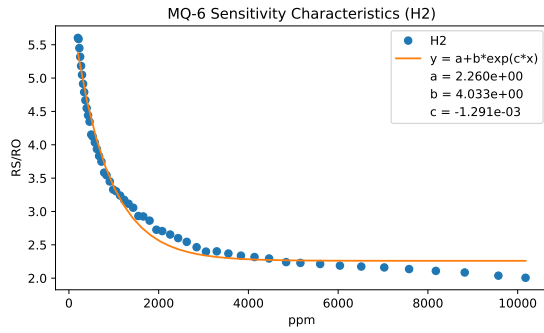




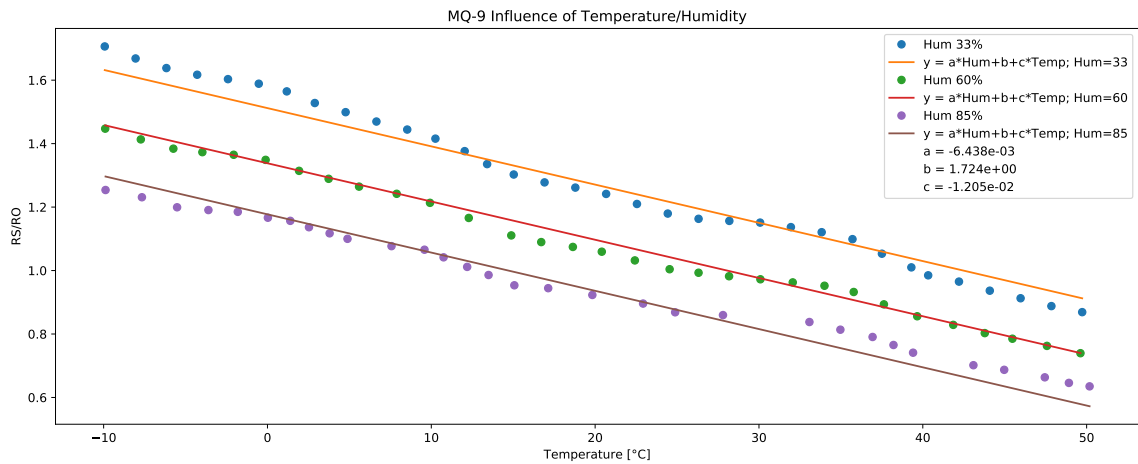
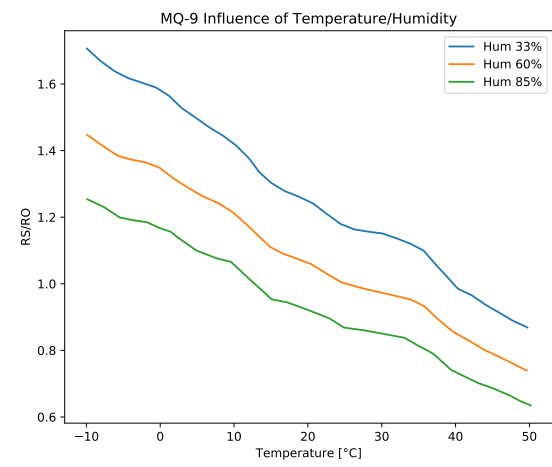
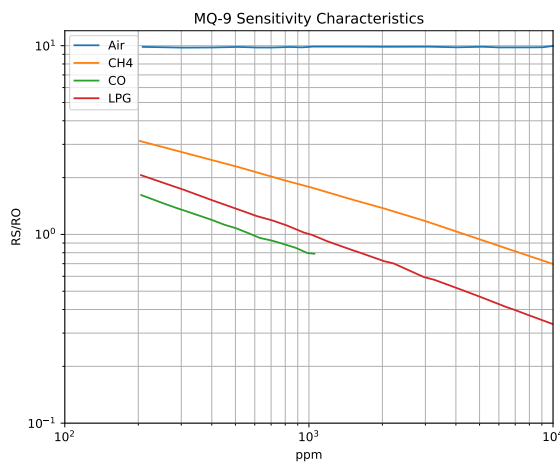
A.4 MQ-6 charakteristiky a odvozené křivky

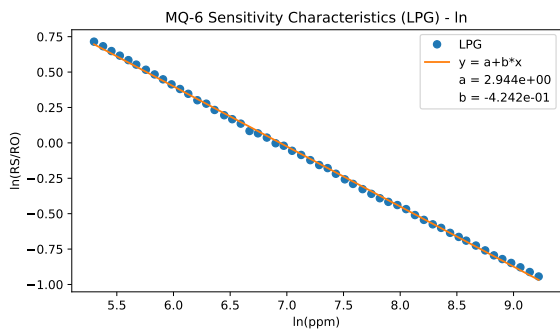
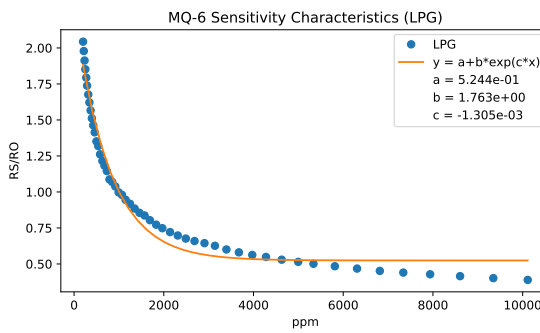
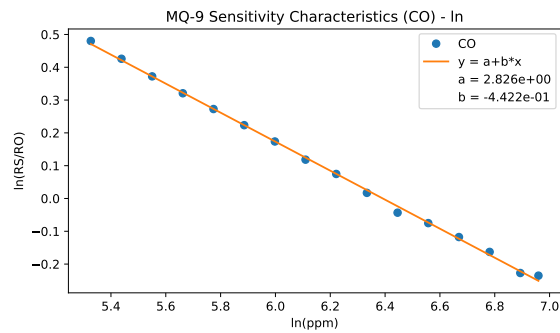
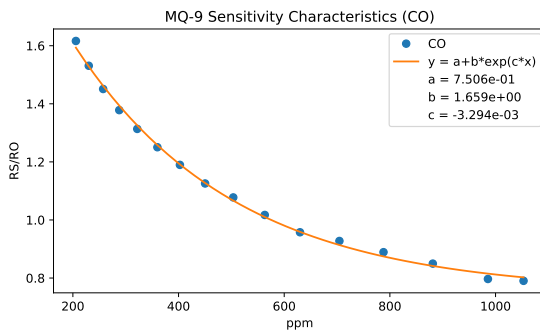
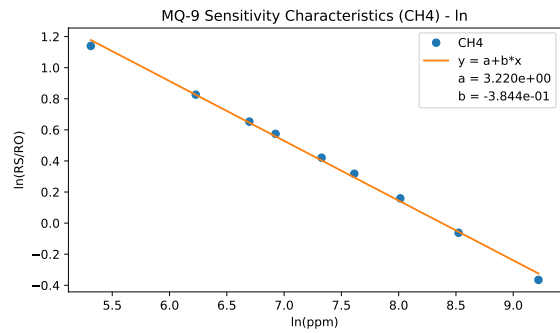
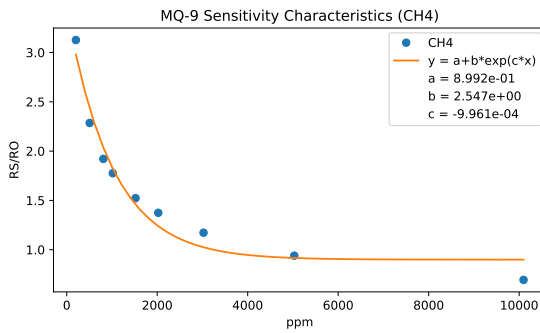
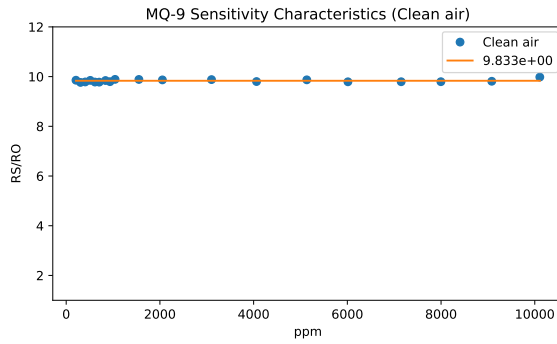






A.5 MQ-9 charakteristiky a odvozené křivky





A.6 Vývojový diagram pre serverovú aplikáciu

