



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**ZAŘÍZENÍ PRO MONITOROVÁNÍ DEGRADAČNÍCH
PROCESŮ U MATERIÁLŮ ŽIVOČIŠNÉHO PŮVODU**

MONITORING EQUIPMENT OF DEGRADATION PROCESSES FOR MATERIAL OF ANIMAL ORIGIN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Vít Chmelař

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Adámek, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**
Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Vít Chmelař

ID: 174316

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro monitorování degradačních procesů u materiálů živočišného původu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s problematikou degradačních procesů u materiálů živočišného původu a senzory pro monitorování plynů se zaměřením na chemorezistivní senzory. Dále se seznamte s mikrokontrolérem Atmel Atmega328, jeho programováním a možnostmi v senzorové technice.

Realizujte a otestujte zařízení pro jednoduché experimentální monitorování odcházejících plyných produktů degradačních procesů probíhajících u materiálů živočišného původu. Pro řízení použijte mikrokontrolér Atmel Atmega328 a pro měření plynů chemorezistivní senzory. Data vyhodnocujte pomocí PC. Zhodnoťte možnosti realizovaného zařízení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 21.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Lukáš Fojcik, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce seznamuje čtenáře s problematikou chemických senzorů a základy degradačních procesů u materiálů živočišného původu. Popisuje některé druhy senzorů a jejich principy. V práci je popsán mikroprocesor Atmel ATmega328, jeho parametry a programování. V další části práce je uveden návrh a výroba zařízení pro monitorování degradačních procesů u materiálů živočišného původu. Po zprovoznění zařízení proběhlo testování. Byly měřeny vzorky kuřecího masa a mléka. Z těchto měření byly stanoveny hodnoty koncentrace plynů, kdy lze vzorky považovat vhodné ke konzumaci.

Klíčová slova

detekce plynů, vodivostní senzor, degradační procesy, rozklad živočišných materiálů, ATmega328, Arduino, Processing

Abstract

The diploma thesis introduces the reader to the problems of chemical sensors and the basics of degradation processes in materials of animal origin. It describes some types of sensors and their principles. Atmel ATmega328 microprocessor, its parameters and programming are described. In the next part of the thesis there is a proposal and production of equipment for monitoring of degradation processes in materials of animal origin. Sample of chicken and milk were measured. From these measurements, the gas concentration values were determined, where samples can be considered suitable for consumption.

Keywords

gas detection, conductivity sensor, degradation processes, degradation of animal materials, ATmega328, Arduino, Processing

Bibliografická citace:

CHMELAR, Vít. Zařízení pro monitorování degradačních procesů u materiálů živočišného původu. Brno, 2019. 49 s., 5s. příloh. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119414>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinovi Adámkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Elektronický nos Peres převzato z [8]	13
Obr. 2 Struktura chemorezistivního senzoru realizovaného technologií tlustých vrstev převzato z [13].....	16
Obr. 3 Vývojové prostředí AVR Studio převzato z [16]	18
Obr. 4 Zapojení sběrnice SPI při zapojení více Slave zařízení.....	20
Obr. 5 Příklad zapojení sběrnice I ² C.....	21
Obr. 6 Vizualizace návrhu zařízení.....	22
Obr. 7 Blokové schéma zařízení	23
Obr. 8 Popis vývojového kitu Arduino Nano převzato z[22]	23
Obr. 9 Převodník logických úrovní pro sběrnici I ² C	24
Obr. 10 Doporučené zapojení stabilizátoru LM1117-1.8	24
Obr. 11 Doporučené zapojení výkonového spínače AP2156	25
Obr. 12 Řídící modul	26
Obr. 13 Deska senzorů	26
Obr. 14 Zapojení senzoru MQ136	27
Obr. 15 Zapojení senzoru MQ137	27
Obr. 16 Zapojení senzoru Sensirion SGP30	28
Obr. 17 Zapojení senzoru BME280	28
Obr. 18 Vývojový diagram programu mikroprocesoru	30
Obr. 19 Vývojový diagram PC programu.....	31
Obr. 20 Grafické rozhraní ovládacího programu	32
Obr. 21 Měření čerstvého mléka.....	34
Obr. 22 Měření 5 hodin starého mléka	35
Obr. 23 Měření 24h starého mléka	35
Obr. 24 Měření 1,5 dne starého mléka.....	36
Obr. 25 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci TVOC.....	36
Obr. 26 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci CO ₂ eq.....	37
Obr. 27 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci sulfanu.....	37
Obr. 28 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci mléka.....	37

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Rozložení pinů konektoru pro propojení desek	25
Tabulka 2 Struktura CSV souboru	32

OBSAH

Seznam obrázků	7
Seznam tabulek	8
Obsah	9
Úvod	11
1. Degradací procesy materiálů živočišného původu	12
2. Elektronické nosy	13
3. Senzory	14
3.1 Chemické senzory	14
3.1.1 Teplotní chemické senzory plynů	14
3.1.2 Optické chemické senzory	15
3.1.3 Elektrochemické senzory s přímým převodem	15
3.1.4 Vodivostní senzory plynů (chemorezistory)	15
3.1.5 Kapacitní senzory plynů (chemokapacitory)	16
3.2 Teplotní senzory	17
3.3 Vlhkostní snímače	17
4. Mikroprocesor ATMEGA328	18
4.1 Programování mikroprocesorů architektury AVR	18
4.1.1 Paralelní programování	19
4.1.2 Sériové programování	19
4.1.3 Programování pomocí bootloaderu	19
4.2 Komunikační sběrnice	19
4.2.1 UART	19
4.2.2 SPI	19
4.2.3 I ² C	21
5. Praktická část	22
5.1 Teoretický popis zařízení	22
5.2 Řídící modul	23
5.3 Modul senzorů	26
5.3.1 Senzor MQ-136	27

5.3.2	Senzor MQ-137	27
5.3.3	Senzor SGP30.....	28
5.3.4	Senzor BME280	28
5.4	Desky plošných spojů	29
6.	Programové Vybavení	30
6.1	Programové vybavení řídicího modulu.....	30
6.2	Program pro PC.....	31
6.3	Možnosti realizovaného zařízení.....	33
7.	Měření vzorků.....	34
7.1	Postup měření.....	34
7.2	Měření vzorku mléka	34
Závěr		38
Literatura.....		39
Seznam symbolů a zkratk		42
Seznam příloh		43

ÚVOD

Monitorování degradačních procesů u materiálů živočišného původu může napovědět určování stavu potravin, například masa. Částečně se stav těchto potravin může určit čichem a zrakem. Bohužel tyto smysly nejsou dokonalé a každý člověk je může vyhodnotit odlišně. Lze to částečně eliminovat využitím znalostí a zkušeností profesionálních hodnotitelů. Za pomoci tzv. elektronických nosů lze dosáhnout opakovatelnosti měření. Jednoduché elektronické nosy využívají např. polovodičové senzory plynů a nedosahují takové přesnosti jako přesnější laboratorní metody. Mezi ně řadíme například spektrální analýzu či plynovou chromatografii. Laboratorní metody jsou složitější a náročnější na vybavení i cenu. Kompromisem je proto využívání elektronických nosů, kdy za použití vhodných senzorů je možné dosáhnout dostatečné přesnosti a jednoduchosti při zachování přijatelné ceny.

Elektronické nosy se mohou uplatnit například v potravinářství při detekci špatně skladovaných potravin, které by při požití mohly vyvolat zdravotní problémy. Elektronické nosy však mohou být užitečným pomocníkem i v dalších oborech, např. kriminalistika, medicína či ochrana životního prostředí.

Pro realizaci zařízení byl použit mikroprocesor ATmega328 od firmy Atmel. V práci jsou přiblíženy jeho parametry a možnosti programování. K zjednodušení návrhu zařízení je využit vývojový kit Arduino Nano, který byl naprogramován v prostředí Arduino. Pro vývoj aplikace pro počítač bylo využito prostředí Processing.

Tato diplomová práce se zabývá návrhem hardwaru a softwaru pro zařízení, které umožní experimentální měření odcházejících plyných produktů degradačních procesů probíhajících u materiálů živočišného původu. Hardware zařízení obsahuje řídicí modul s mikroprocesorem a desku senzorů. Řídicí modul umožňuje zpracování měřených dat z analogových a digitálních senzorů a odeslání těchto dat do počítače pro další zpracování. Software pro PC zobrazuje měřená data a umožňuje jejich export pro zpracování pomocí dalších programů.

1. DEGRADAČNÍ PROCESY MATERIÁLŮ ŽIVOČIŠNÉHO PŮVODU

Rozklad masa začíná ihned po smrti a způsobuje rozklad měkké tkáně. Chemický proces rozkladu je velmi komplexní a zahrnuje rozklad měkkých tkání, kdy materiál prochází jednotlivými stádii rozkladu. U živočišných produktů jako je mléko se na degradaci podílí psychrofilní organismy. Většina těchto organismů může být zničena pasterací. Mikrobiální znehodnocení potravin zahrnuje degradaci bílkovin, sacharidů a tuků mikroorganismy nebo jejich enzymy. Produkty živočišného materiálu se rozkládají velmi rychle vlivem nesprávného zacházení a nevhodného skladování. Kvalita potravin se snižuje vlivem rozkladu živin. To způsobuje změnu barvy, textury a zápachu. [1]

Během života zvířete se tyto změny vůbec nevyskytují, po smrti začnou mikroorganismy pracovat na rozkladu. Vnitřní a vnější vlivy jako teplota, vlhkost, koncentrace kyslíku a vystavení světlu jsou podmínky, které umožňují rozvoj mikroorganismů. To způsobí nežádané fyzikálně chemické změny v mase.

Tři základní typy mikroorganismů se podílí na rozkladu v živočišných materiálech, půdě a dalších organických sloučeninách. Jedná se o anaerobní, fakultativní a aerobní bakterie. Anaerobní bakterie ke svému životu nepotřebují kyslík, aerobní jsou aktivní pouze za přístupu kyslíku a fakultativní mohou pracovat v obou situacích. [2]

Anaerobní rozklad je mnohem méně častý, s výjimkou bažin a rašelinišť. Anaerobní bakterie produkují jiné druhy enzymů a jejich produkty než bakterie aerobní. Během anaerobního rozkladu se uvolňuje mnoho živin jako plyny, ve srovnání s aerobním je tento proces nedokonalý. Anaerobní rozklad vytváří mnoho uhlíkatých organických sloučenin. Anaerobní bakterie přeměňují velkou část dusíku v organických sloučeninách na amoniak NH_3 .

V podobných anaerobních reakcích dochází ke ztrátě mikroživin. Jedním z příkladů je sulfan H_2S , který je typický zápachem zkažených vajec. Naproti tomu aerobní rozklad produkuje rostlinný a stabilnější sulfát (SO_4). Mnoho sloučenin vznikajících v aerobním rozkladu silně zapáchá. [2]

Vlivem působení mikroorganismů vznikají těkavé organické látky VOC (volatile organic compound – dále VOC). Dle povahy detekovaných VOC je možné zjistit stav sledovaných živočišných materiálů.

Množství vylučovaných organických těkavých látek (VOC) není stejné pro každé zvíře a závisí zejména na věku, pohlaví, plemenu, vlivu prostředí a zdroji potravy. Alkohol, karboxylové kyseliny, estery, laktony, furan, pyridin, sulfan a amoniak lze detekovat téměř vždy při rozkladu živočišných materiálů. Lze je tedy považovat jako indikátor rozkladu.

Při hnilobě měkkých tkání dochází působením mikroorganismů k rozkladu za vzniku hnilobných plynů (H_2S , CO_2 , CH_4 , NH_3 , SO_2 , H_2). [3]

2. ELEKTRONICKÉ NOSY

Elektronický nos je zařízení, které se využívá pro detekci zápachů nebo vůní. Jsou využívána nejen v průmyslu a gastronomii, ale také v oblasti kriminalistiky či zdravotnictví. V potravinářství je lze uplatnit při kontrole jakosti výrobků, detekci kontaminace či pro monitorování podmínek skladování. V elektronickém nosu je využita kombinace senzorů a systému, který signál porovnává s referenčním signálem. [4]

Elektronický nos se skládá z pole chemických senzorů pro detekci plynů. Jako senzory se nejčastěji využívají senzory na bázi oxidů kovů či senzory s vodivými polymery. Molekuly analyzované látky způsobí změnu vodivosti senzoru. Jedná se o tzv. chemorezistivní senzory. Využívají se také piezoelektrické senzory, kdy po navázání chemické látky na povrch piezoelektrického krystalu dojde ke změně vlastní frekvence krystalu. Dalším typem používaných senzorů jsou takzvané ChemFET. Jde o tranzistor s chemickým senzorem. Absorbovaná látka na řídicí elektrodě ovlivňuje změnu některých charakteristik tranzistoru. [5]

Před samotným použitím elektronického nosu je nutné nejprve nos vytrénovat měření vzorků, které jsou následně použity jako referenční. Dále je již možné měřit vzorky, které jsou následně porovnávány se vzorky referenčními. [6]

Komerčně dostupné elektronické nosy jsou relativně drahá zařízení. Zařízení Cyranose® 320 od firmy Cyrano Sciences je dostupné za přibližně 8000 \$. Elektronický nos zNose 4300 od firmy Electronic Sensor Technology lze koupit za 30000 \$. [7] Vyšší cena těchto zařízení je dána větším počtem senzorů a možností přenositelnosti. Díky tomu je lze jednoduše využívat i mimo laboratoř.

Příkladem levného komerčně dostupného elektronického nosu je zařízení Peres na obr. 1. Je určen k testování jakosti hovězího, vepřového, kuřecího a rybího masa. Využívá senzorů teploty, vlhkosti, VOC a amoniaku. Změřená data jsou následně odeslána do chytrého telefonu a je provedeno vyhodnocení jakosti masa. V aplikaci je poté zobrazeno, zda je maso vhodné ke konzumaci. Cena zařízení se pohybuje kolem 3000 Kč. [8]



Obr. 1 Elektronický nos Peres převzato z [8]

3. SENZORY

Tato část práce je věnována popisu principu senzorů neelektrických veličin se zaměřením na chemické senzory. Neelektrické veličiny jsou takové veličiny, které nelze vyjádřit pomocí elektrických veličin, například elektrické napětí či elektrický proud. Pro měření těchto veličin je nutné využít převodníky umožňující převod neelektrické veličiny na elektrickou veličinu, která je jednodušejší zpracovatelná. Využívá se mnoho různých mechanismů a vzhledem k zaměření práce jsou zde přiblíženy zejména senzory plynů. [10]

3.1 Chemické senzory

Chemické senzory jsou speciálním typem senzorů. K fyzikálnímu převodníku, který může být odporový, kapacitní aj. je nutná rekogniční část umožňující převod chemické veličiny na veličinu fyzikální. Rekogniční vrstvou bývá obvykle citlivá vrstva či membrána.

V dnešní době je dostupné velké množství těchto senzorů. Dělí se podle schopnosti detekovat určité typy plynů. Požadavky jsou kladeny na citlivost, odezvu, selektivitu, dobu regenerace. Dále je možné senzory dělit dle principu detekce a měřené veličiny. Každý typ senzoru je proto vhodný pro určitou aplikaci.

V následujících podkapitolách jsou popsány některé z běžně používaných typů senzorů plynů rozdělených dle jejich principu. [9]

3.1.1 Teplotní chemické senzory plynů

Teplotní chemické senzory využívají principu přenosu tepla a jeho změny. V oblasti chemické analýzy lze využít čtyři principy pro konstrukci analyzátorů. [10]

Analyzátory využívající tepelné vodivosti plynů - tepelná vodivost směsi plynů je pro binární směsi dána směšovací pravidlem. Měření využívá srovnávací metodu měřením známého a analyzovaného plynu. Z toho je zřejmé, že analyzátor má dvě měrné komůrky.

Analyzátory termochemické využívají termochemické reakce a pochody vzniklé změnami teplot. Tyto analyzátory se mohou použít pro měření, kde dochází k reakci plynu s plynem, plynu s kapalinou a kapaliny s kapalinou. Využívají měřicí a porovnávací komory. V obou komorách je napnutý platinový drátek, který je zahříván elektrickým proudem. Platinový drátek má funkci katalyzátoru, který je zapojen do můstku a je napájen proudovým zdrojem. Při vzniklé reakci se uvolňuje teplo, které zvyšuje teplotu odporového článku. Tyto analyzátory jsou vhodné pouze pro hořlavé plyny.

Analyzátory využívající změny elektrické vodivosti polykrytalických polovodičů vlivem plynu - využívá se zde změny elektrické vodivosti polovodiče při reakci s chemicky redukováným plynem. Změny vodivosti jsou vratné, děj je tím rychlejší, čím je vyšší teplota odporového článku. Využívají se zde slinuté oxidy zinku, železa, cínu, wolframu a titanu. Tento typ senzoru je velmi používaný pro analýzu plynu, a řadí se také mezi chemorezistivní typ senzoru.

Analyzátory termomagnetické využívají silové účinky paramagnetických plynů v magnetickém poli a změny magnetických vlastností plynu nad teplotou Couriova bodu. Tyto změny ovlivňují teplotu měřicího odporového článku. [10]

3.1.2 Optické chemické senzory

Fungují na principu modulace světelného záření průchodem skrze měřené prostředí. V těchto senzorech se porovnávají dva signály. Změna optického signálu způsobená průchodem látky, která mění interakci s plynem a referenčním prostředím, které optické vlastnosti nemění. Měří se útlum, polarizace a jiné vlastnosti. [11]

Jako zdroj optických signálů se využívají LED diody či polovodičové lasery. Pro detekci záření se využívají PIN diody, fotodiody či fototranzistory. Výhodou tohoto druhu senzoru je odolnost vůči korozi, možnost použití v hořlavých a výbušných prostředích, malé rozměry a hmotnost.

3.1.3 Elektrochemické senzory s přímým převodem

Základem těchto senzorů je elektrochemický převodník, který řadíme mezi fyzikální převodníky. Jde o zvláštní elektrochemické senzory, které nepotřebují rekogniční část, tím se zjednoduší převodní část. Převodník je elektrochemický článek, který je tvořen elektrodami, mezi kterými je elektrolyt (solný roztok nebo silná kyselina). [12]

Elektrochemické senzory pracují na elektrochemickém principu. Jsou založeny na redukci či oxidaci. Díky této reakci dojde ke změně potenciálu aktivní elektrody vůči elektrodě referenční. Elektrolyt převádí neelektrickou veličinu na elektrickou. Měřením se vyhodnocuje signál z elektrod. Zdroj proudu, který dodává proud mezi aktivní a pomocné elektrody, dorovnáva změnu potenciálu na původní hodnotu. Tato hodnota je přímo úměrná hodnotě koncentrace plynu. Hodnota signálu je určena počtem elektrod, jejich druhem, citlivostí a parametry, které jsou měřeny.

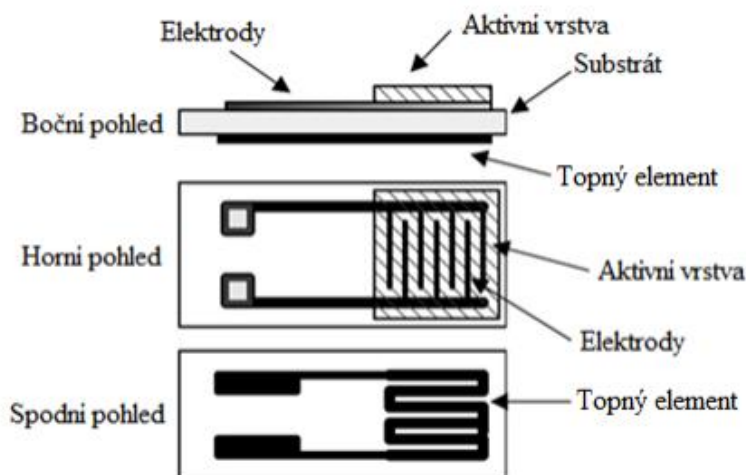
Mezi tento druh senzorů řadíme impedimetrické senzory, polarografické senzory voltametrické senzory, amperometrické senzory a potenciometrické senzory.

3.1.4 Vodivostní senzory plynů (chemorezistory)

Vodivostní senzory plynů řadíme mezi elektrochemické senzory s nepřímým převodem. Chemorezistor je nejjednodušší typ senzoru a nejčastěji používaný, zejména díky nízké ceně, dlouhé životnosti, vysoké spolehlivosti a velmi jednoduchému vyhodnocování. Patří k senzorům založených na principu změny vodivosti aktivní vrstvy v závislosti na druhu a koncentraci okolního plynu. [12]

Základem těchto senzorů je adsorpce (přichycení na povrchu), absorpce (vnikání do objemu) a chemisorpce (vznikání pevných chemických vazeb) molekul plynu nebo páry s pevnou látkou aktivní vrstvy. Mění se tím vnitřní a povrchová vodivost aktivní vrstvy. Vodivost narůstá, nebo klesá podle toho, zda detekovaný plyn dodává nebo odčerpává elektrony. Vodivost závisí na koncentraci měřeného plynu a po navrácení na původní hodnotu se i vodivost vrátí na původní hodnotu. Měřením vodivosti respektive elektrického odporu polovodiče lze určit koncentraci plynu. [11]

Nejčastěji se na výrobu aktivní vrstvy využívají polovodivé oxidy (SnO_2 , ZnO , TiO_2 apod). Aktivní vrstva (obr. 2) se nesmí měnit vlivem okolní atmosféry a musí být chemicky stálá. Nežádoucí je např. oxidace, což se u polovodivých oxidů již nemůže přihodit. Také je vhodné, aby byl materiál pórovitý, tím se zvětší kontaktní plocha a citlivost senzoru. Aktivní vrstvy těchto senzorů se vyrábí tenkovrstvou a tlustovrstvou technologií. Selektivitu a citlivost těchto senzorů lze ovlivnit dopanty, katalyzátory a selektivními membránami. [11]



Obr. 2 Struktura chemorezistivního senzoru realizovaného technologií tlustých vrstev převzato z [13]

Další součástí těchto senzorů jsou topné elementy (obr. 2), které slouží k vyhřívání aktivní vrstvy na určitou teplotu. Díky ohřevu atomy konkrétního detekovaného plynu snáze překonají aktivační energii chemických reakcí než ostatní plyny. Běžně se využívají teploty v rozmezí $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Každý plyn má pro danou aktivní vrstvu teplotu, kdy se uplatňuje na vodivosti nejvíce. Jako podkladový materiál se pro tlustovrstvé senzory nejčastěji využívá korundová keramika a pro tenkovrstvé SiO_2 . Hlavními parametry ovlivňujícími výběr substrátu jsou co největší tepelná odolnost a co nejmenší ovlivňování složení okolní atmosféry při zahřátí.

3.1.5 Kapacitní senzory plynů (chemokapacitory)

Stejně jako vodivostní senzory i senzory kapacitní se řadí do skupiny elektrochemických senzorů s nepřímým převodem. Působením plynu na chemicky citlivou vrstvu umístěnou mezi dvěma elektrodami senzoru se mění permitivita dielektrika.

Principem těchto senzorů je měření změny kapacity této vrstvy, která je u těchto senzorů malá, v řádech pF. Tyto senzory se často využívají pro měření vlhkosti. Jako citlivá vrstva se využívají tenké vrstvy oxidu Al_2O_3 a Ta_2O_5 a různé polymerní vrstvy.

3.2 Teplotní senzory

Teplotní senzory je možné podle fyzikálního principu převodu dělit na senzory odporové kovové, odporové polovodičové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické a jiné speciální senzory. [14]

Odporové kovové senzory pracují na principu změny odporu kovu při změně teploty. Zahříváním kovů se zvětšuje amplituda kmitů atomů krystalové mřížky, které pak kladou větší odpor průchodu elektronů. Nejčastějším materiálem využívaným pro kovové odporové senzory je platina, která je využívána z důvodu vysoké teploty tání, chemické netečnosti a stálosti. Dalším často využívaným materiálem je nikl. Nikl má vysokou citlivost a rychlou časovou odezvu. Nevýhodou je však značná nelinearita a menší teplotní rozsah.

Polovodičové odporové senzory dělíme na polykrystalické - termistory (pozistory a negistory) a monokrystalické odporové senzory - bez PN přechodu nebo s jedním a více PN přechody.

Polovodičové senzory s PN přechodem využívají teplotní závislost napětí PN přechodu v propustném směru. Dělíme je na diodové, tranzistorové a monolitické integrované senzory. U monolitických integrovaných senzorů je součástí jednoho čipu samotné čidlo i s obslužným elektrickým obvodem.

Termoelektrické senzory využívají Seebeckův jev. Jedná se o jev, při kterém se přeměňuje tepelná energie na elektrickou. Termočlánek je složen ze dvou materiálů, různých vodičů a polovodičů, které jsou na konci spojené.

3.3 Vlhkostní snímače

Nejčastěji se používají senzory kapacitní, odporové nebo polovodičové využívající změny vlastností materiálu v závislosti na absorpci vody z vodní páry. [14]

Kapacitní senzory využívají jako dielektrikum polymery, které v závislosti na absorpci vody způsobují změnu kapacity kondenzátoru. Hodnota kapacity je pak závislá na relativní vlhkosti. Pro snazší zpracování naměřených hodnot se často setkáme se senzory vybavené digitálním rozhraním. Kapacitní senzory se vyznačují příznivou dobou odezvy, jsou odolné vůči kondenzaci a mají závislost na teplotě.

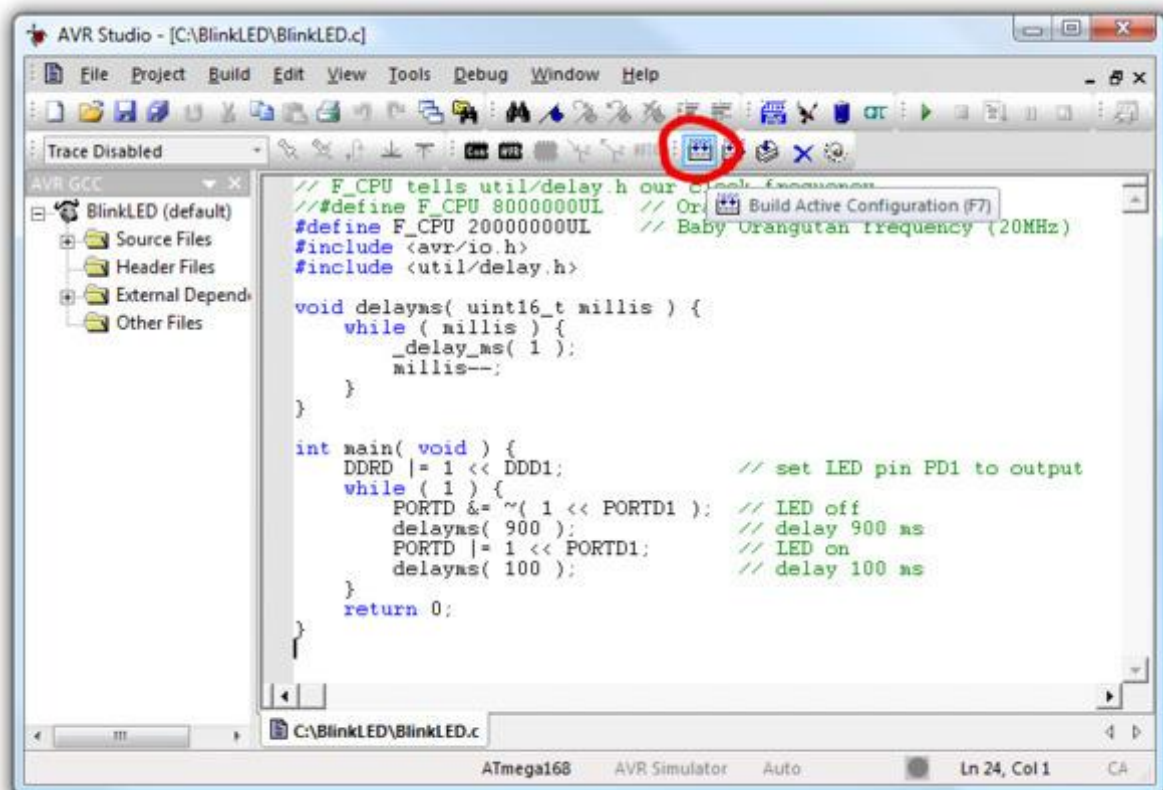
Odporové senzory vlhkosti využívají změnu vodivosti na množství absorbované vody v materiálu. Používá se např. polyvinylalkohol s příměsí chloridu či bromidu lithného. Nevýhodou těchto čidel je nízký rozsah měření a citlivost na orosení. Výhodou je přesnost a stabilita.

4. MIKROPROCESSOR ATMEGA328

Mikroprocesory řady ATmega od firmy Atmel jsou všeobecně známé a rozšířené. V případě mikroprocesoru ATmega328 se jedná o 8bitový mikroprocesor vybavený instrukční sadou RISC a 23 vstupně/výstupními piny. Je vybaven 32 kB FLASH pamětí, 1 kB EEPROM a 2 kB SRAM pamětí. Pracuje při širokém napájecím napětí 1,8 V až 5,5 V a maximální hodinový kmitočet může být 20 MHz. Je vybaven periferiemi, např. 8bitový a 16bitový čítač, A/D převodník, PWM a sběrnice USART, SPI a TWI. Pro snížení spotřeby je procesor vybaven několika režimy spánku. [15]

4.1 Programování mikroprocesorů architektury AVR

Programy pro architekturu AVR je možné vytvářet ve více nástrojích. Jedná se např. o Atmel Studio dodávané přímo výrobcem (obr. 3), IDE založených na avr-gcc kompilátoru jako je např. Arduino či placené nástroje jako je IAR Embedded Workbench. Nejčastěji se využívá programovací jazyk C či C++. Je možné využívat i jazyk symbolických adres (assembler) avšak z hlediska uživatele není tak pohodlný jako výše jmenované jazyky. Dnes se využívá zejména ve specifických případech.



Obr. 3 Vývojové prostředí AVR Studio převzato z [16]

Po vytvoření programu pro mikroprocesor a jeho přeložení do strojového kódu se musí program do paměti mikroprocesoru nahrát. V případě čipu ATmega328 je zde několik možností uvedených níže, jak tento mikroprocesor naprogramovat.

4.1.1 Paralelní programování

Paralelní programování se v dnešní době již často nevyužívá, vzhledem k nutnosti připojení velkým množstvím vodičů k programátoru, respektive vyjmutím mikroprocesoru z obvodu a vložením do patice programátoru. Ale jde o vhodný způsob, pokud je nesprávným nastavením konfiguračních bitů procesoru znemožněno sériové programování.

4.1.2 Sériové programování

Sériové programování používá sběrnici SPI a využívá programování ISP (In-System Programming) vyvinuté firmou Atmel. ISP umožňuje naprogramovat i osazený procesor v zařízení bez nutnosti vyjmutí procesoru, což v době SMD součástek je takřka nutností. Vyžaduje připojení pouze šesti vodičů.

4.1.3 Programování pomocí bootloaderu

Bootloader, tzv. zavaděč je speciální program, umístěný ve vyhrazené části paměti. Po zapnutí napájení se okamžitě začne vykonávat kód bootloaderu, který je uložen v paměti FLASH. Zavaděč poté může načíst program například přes sběrnici UART, uloží program přichozí přes UART do paměti a poté jej začne vykonávat. [17]

Bootloader se nemusí omezit pouze na sběrnici UART, ale může využívat i jiná rozhraní jako např. I²C, Ethernet, WiFi apod. Toto je využíváno zejména při vývoji. Vzhledem k této možnosti programování se nemusí využívat speciální programátor. Tato možnost je využívána i pro vzdálenou aktualizaci již běžících zařízení u zákazníka.

4.2 Komunikační sběrnice

Pro komunikaci externích obvodů s mikroprocesorem a mikroprocesoru s počítačem je třeba zvolit vhodné způsoby komunikace, pomocí kterých spolu budou jednotlivá zařízení komunikovat. Je mnoho komunikačních protokolů, u mikroprocesoru Atmel ATmega328 jde například o sběrnice I²C, UART a SPI. [14]

4.2.1 UART

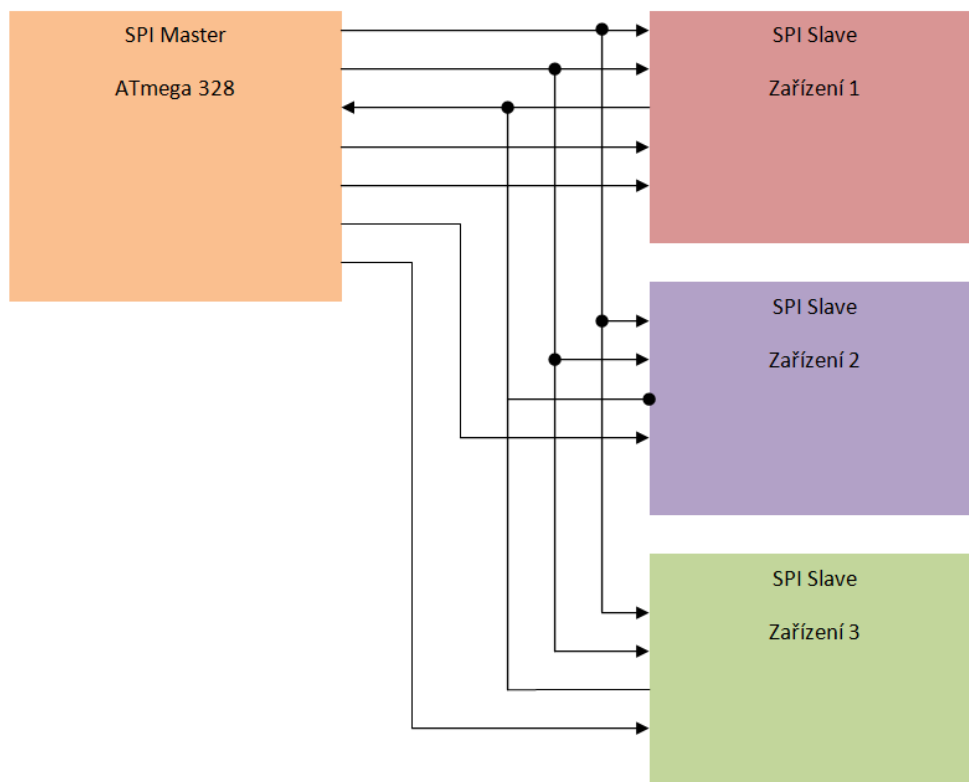
Jde o sériový přenos dat pomocí vodičů TxD a RxD. UART se využívá u mnoha periférií a také pro komunikaci s počítačem. Jedná se o jednu z nejrozšířenějších komunikačních sběrnic. Vysílač i přijímač musí mít nastavené stejné parametry.

4.2.2 SPI

Sběrnice SPI představuje jeden z druhů sériových sběrnic [18], které se obvykle používají pro propojení mikroprocesoru a dalších obvodů, kterými mohou být např. paměti EEPROM, displeje, SD karty, A/D převodníky atd.

Komunikace probíhá pomocí 3 společných vodičů, viz obr. 4, MISO (Master In, Slave out), MOSI (Master out, Slave In) a SCK (hodinový signál). Adresování probíhá pomocí pinu CS (Chip-Select). Těchto pinů bude tedy tolik, kolik je zařízení připojených na sběrnici. Na jedné sběrnici je právě jedno zařízení typu Master viz obr. 3, které se stará o veškeré řízení komunikace po sběrnici. Obvykle se jedná o mikroprocesor. Zařízení typu Slave může být více a jejich správná spolupráce je zajištěna pomocí adresovacího pinu CS, kdy mikroprocesor nastaví pin do log. 0 toho zařízení, se kterým chce komunikovat. Ostatní zařízení se umlčí. Po dokončení komunikace s daným zařízením mikroprocesor opět nastaví příslušný pin CS do log. 1 a poté může začít komunikovat s dalším zařízením. Výhodou této sběrnice je její velká jednoduchost, kdy si lze sběrnici představit jako několik posuvných registrů. Další výhodou je relativně vysoká přenosová rychlost v porovnání například se sběrnici I²C. Nevýhodou je nutnost adresování pomocí pinu CS, např. při využívání 3 Slave zařízení nám tato komunikace zabere dohromady 6 pinů mikroprocesoru (3 datové + 3 adresovací). Při větším počtu Slave zařízení by se toto dalo částečně eliminovat například demultiplexorem.

Tato sběrnice se využívá i pro programování mikroprocesorů, jde o tzv. ISP (In-system programming), díky čemuž lze programovat mikroprocesor uvnitř obvodu, bez potřeby vyjmutí mikroprocesoru a vkládání do speciálního programátoru.



Obr. 4 Zapojení sběrnice SPI při zapojení více Slave zařízení

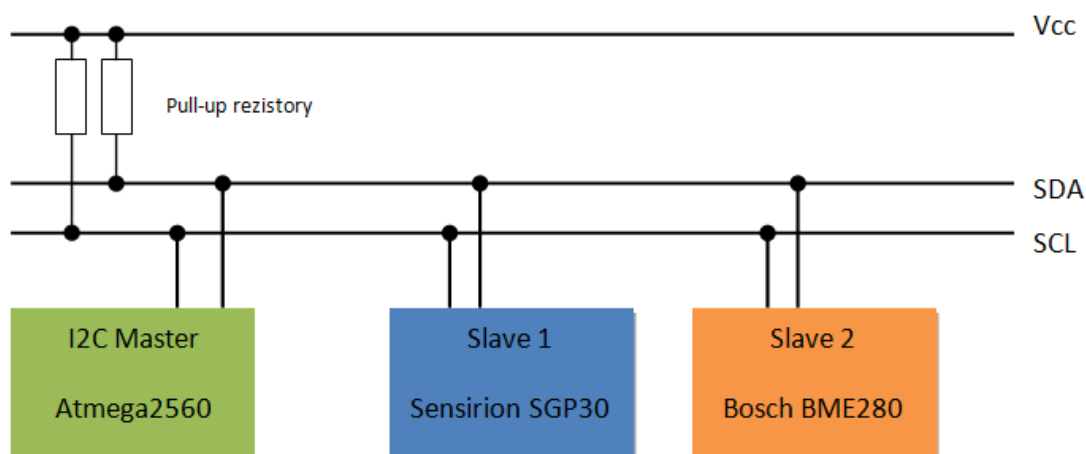
4.2.3 I²C

Sběrnici vyvinula firma Philips. Zkratka I²C vychází z anglického Inter-Integrated Circuit [19]. Jedná se o interní sériovou datovou sběrnici, která se využívá při komunikaci v rámci jednoho zařízení.

Kvůli nárokům firmy Philips na ochrannou známku I²C se lze také setkat se zkratkou TWI (Two Wire Interface), kterou představila firma Atmel.

Sběrnici I²C lze nalézt ve výbavě mikroprocesorů, pamětí, obvodu reálného času, A/D převodníků, D/A převodníků, senzorů atd.

Podobně, jako u SPI sběrnice, se jedná o protokol typu master/slave. Využívá se zde jiného adresování a komunikace není duplexní. Proto pro komunikaci stačí pouze 2 vodiče - SDA je vodič, po kterém jsou přenášeny data a SCL je vodičem hodinového signálu viz obr. 5. Adresování probíhá pomocí přidělené 7bitové či 10bitové adresy. Jelikož se jedná o sběrnici typu otevřený kolektor, musí se na vodiče SDA a SCL přidat ještě pull-up rezistory. [20][21]



Obr. 5 Příklad zapojení sběrnice I²C

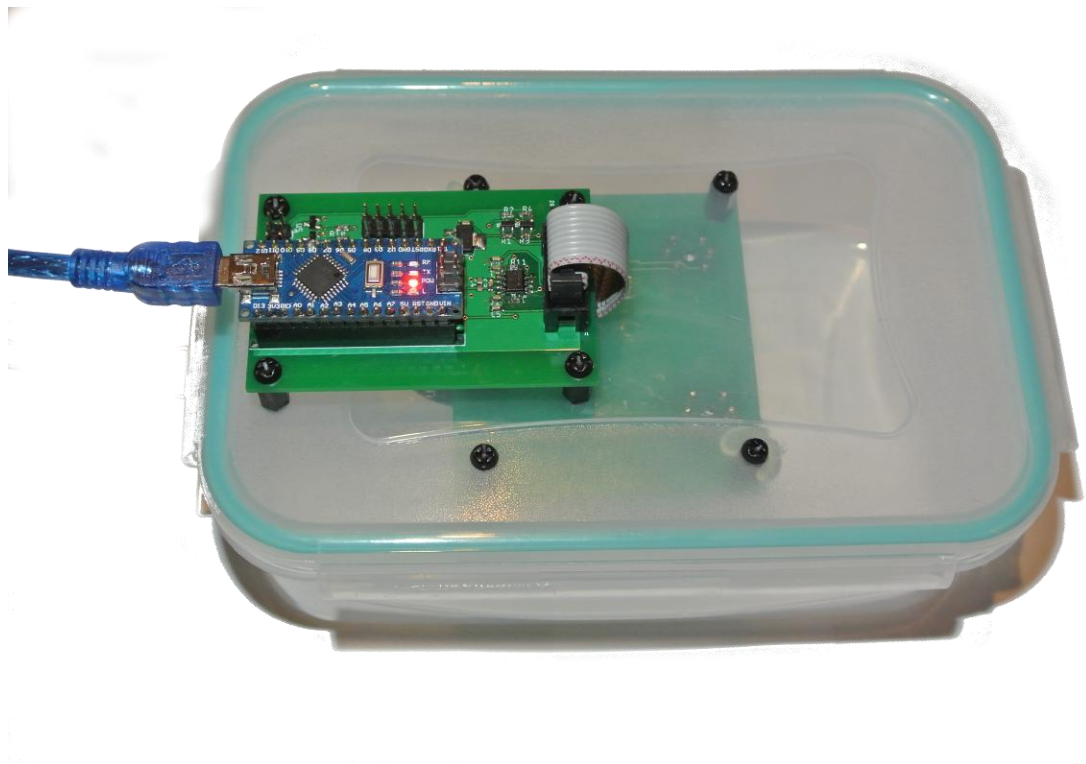
5. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část je zaměřena na technické vybavení a programové vybavení prototypu zařízení pro monitorování degračních procesů u materiálů živočišného původu.

5.1 Teoretický popis zařízení

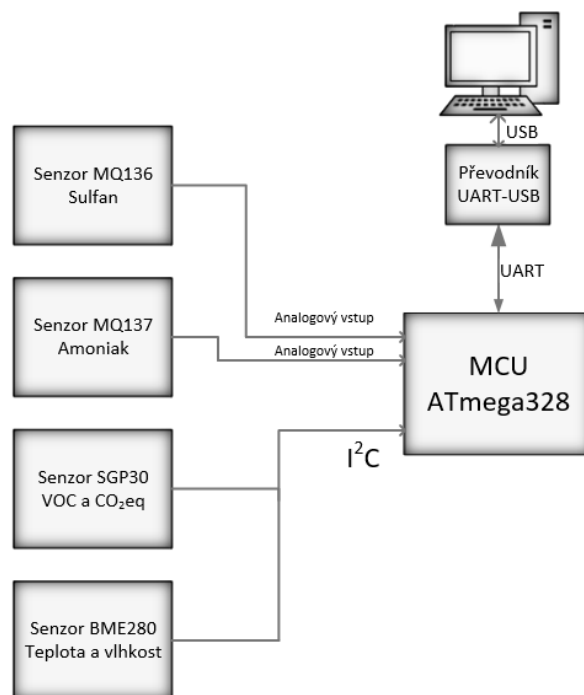
V této kapitole je rozebrán postup návrhu zařízení a jednotlivé komponenty. Zařízení měří koncentraci sulfanu, amoniaku, TVOC, přepočtenou hodnotu oxidu uhličitého, teplotu a vlhkost. Data ze senzorů jsou zpracována mikroprocesorem ATmega328 a odeslána k dalšímu zpracování pomocí sběrnice UART do počítače. Počítač celý proces měření ovládá a vyhodnocuje.

Zařízení je umístěno do potravinové dózy viz obr. 6. Uvnitř krabičky je ve víku umístěna deska senzorů, z venkovní části je připevněn řídicí modul. Tato krabička byla zvolena s ohledem na jednoduchou výměnu měřených vzorků. Také by nemělo docházet k ovlivňování měření uvolňováním chemických látek z krabičky, protože jde o obal určený na potraviny. Další výhodou tohoto řešení je jednoduché čištění měřicí komory. Pokud dojde ke kontaminaci, lze jednoduše sejmut víko s elektronikou a samotnou dózu vyčistit. Vhodnějším materiálem pro konstrukci krabičky by bylo sklo. Volba skla by však komplikovala mechanické provedení, bylo proto přistoupeno ke kompromisu v podobě plastového boxu.



Obr. 6 Vizualizace návrhu zařízení

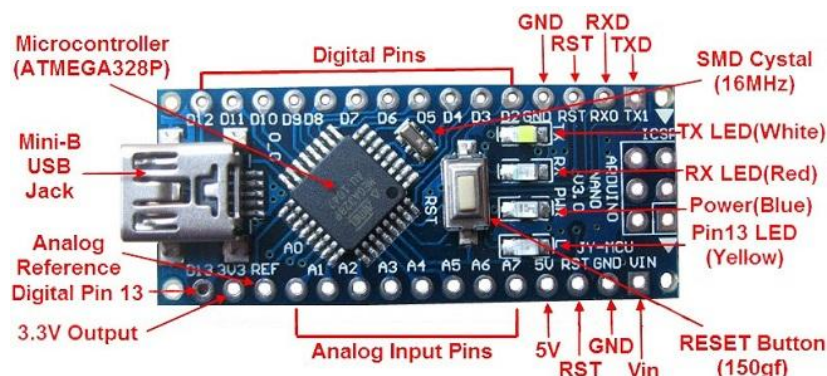
Na obr. 7 je možné vidět návrh blokového schématu řídicí jednotky, jednotlivé bloky jsou popsány v dalších kapitolách.



Obr. 7 Blokové schéma zařízení

5.2 Řídící modul

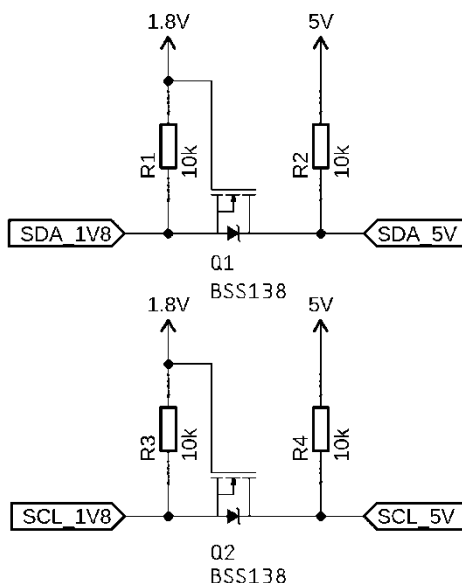
Pro řízení celého zařízení byl zvolen mikroprocesor od ATmega328. Pro zjednodušení návrhu desky plošných spojů je použit vývojový kit Arduino Nano viz obr. 8. Tento vývojový kit obsahuje mikroprocesor ATmega328, napěťový stabilizátor, převodník UART<->USB, krystal, tlačítko reset a stavové LED. Lze jej jednoduše programovat pomocí bootloaderu.



Obr. 8 Popis vývojového kitu Arduino Nano převzato z[22]

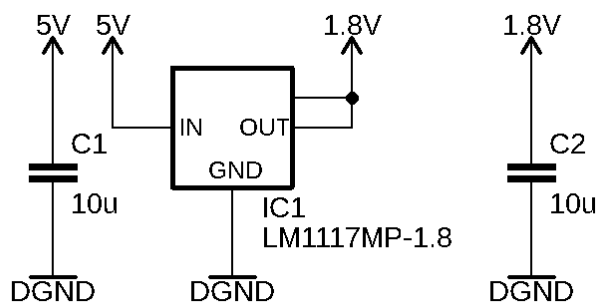
Kromě vývojového kitu obsahuje DPS řídicího modulu také převodník napěťových úrovní pro sběrnici I²C, lineární stabilizátor na 1,8 V, spínače pro vyhřívací elementy chemorezistivních senzorů a další nezbytnosti jako jsou kondenzátory pro blokování napájecího napětí a konektor umožňující připojení senzorové desky. Pro možné budoucí rozšíření jsou na kolíkové lišty vyvedeny tranzistorem posílené výkonové výstupy a výstupy umožňující připojení LED.

Senzory připojené na sběrnici I²C jsou napájeny 1,8 V, nelze je proto připojit přímo ke kitu Arduino Nano, které je napájeno 5 V. Je nutné použít převodník napětíových úrovní podporující obousměrnou komunikaci. To umožňuje zapojení z obr. 9.



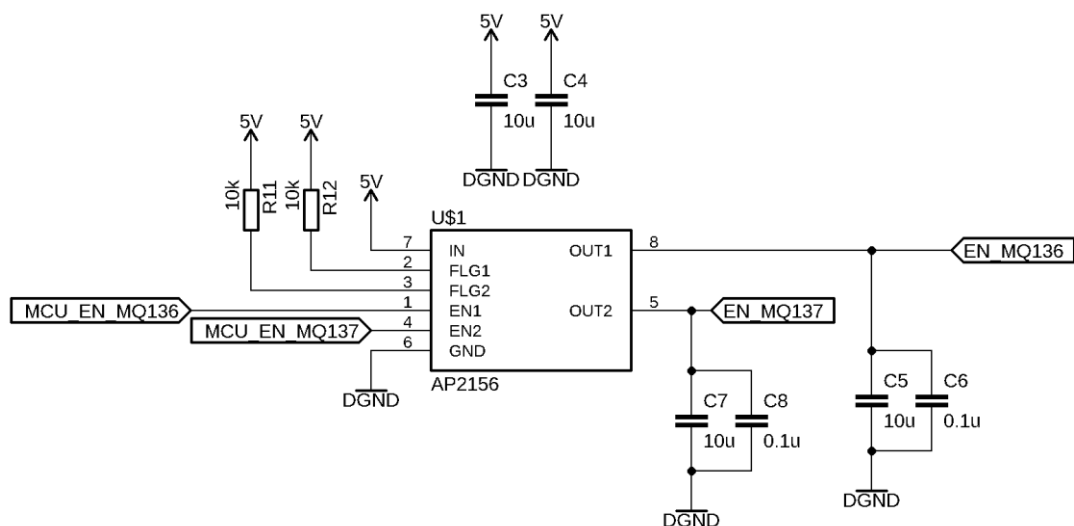
Obr. 9 Převodník logických úrovní pro sběrnici I²C

Napájecí větev 1,8 V je realizována pomocí low-dropout stabilizátoru LM1117-1.8 od firmy Texas Instruments. Tato napájecí větev se využívá pro senzory Bosch BME280 a Sensirion SGP30, které jsou umístěny na desce senzorů a pro napájení převodníku logických úrovní pro sběrnici I²C. Zapojení stabilizátoru viz obr. 10 vychází z doporučeného zapojení od výrobce, které lze nalézt v katalogovém listu součástky.



Obr. 10 Doporučené zapojení stabilizátoru LM1117-1.8

Pro spínání topných elementů chemorezistivních senzorů je použit obvod AP2156SG-13 od firmy Diodes Incorporated. Jde o dvojitý výkonový spínač s nízkým úbytkem napětí v sepnutém stavu. Má zabudovanou tepelnou a proudovou ochranu. Více informací o tomto obvodu lze najít v katalogovém listu součástky [23]. Zapojení výkonového spínače vychází z doporučeného zapojení výrobce viz obr. 11, které se nachází v katalogovém listu.



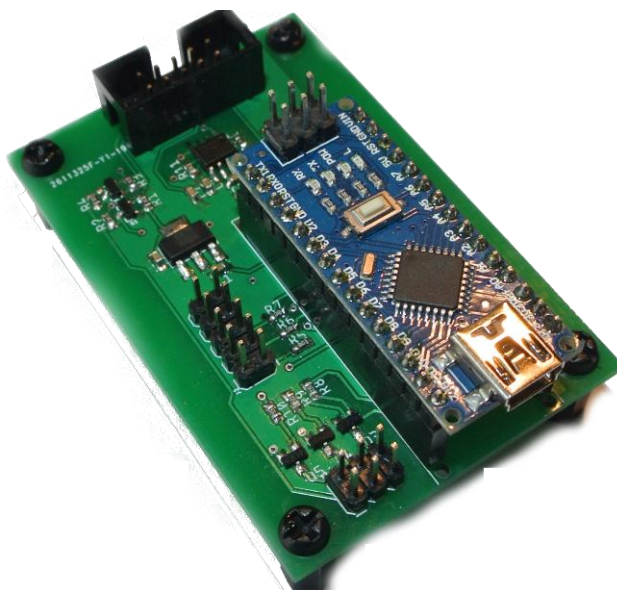
Obr. 11 Doporučené zapojení výkonového spínače AP2156

Pro možné budoucí rozšíření zařízení jsou na výstupy mikroprocesoru připojeny tři bipolární tranzistory BC817, které lze využít ke spínání zátěže. Také jsou připraveny výstupní piny umožňující připojení LED. Připojení desky senzorů k desce mikroprocesoru je realizováno pomocí desetipinového konektoru, rozložení jednotlivých pinů konektoru je v Tabulce 1.

Tabulka 1 Rozložení pinů konektoru pro propojení desek

Pin #	Název signálu ve schématu	Funkce
1	1.8V	Napájecí napětí 1,8V
2	EN_MQ136	Sepnutí topného elementu senzoru MQ136
3	SDA_1V8	Sběrnice I2C signál SDA
4	ADC_MQ136	Analogový výstup ze senzoru MQ136
5	SCL_1V8	Sběrnice I2C signál SCL
6	EN_MQ137	Sepnutí topného elementu senzoru MQ137
7	-	Není použit
8	ADC_MQ137	Analogový výstup ze senzoru MQ137
9	DGND	Zem
10	-	Není použit

Osazenou DPS lze vidět na obr. 12. Rozměr DPS je 70 mm x 45 mm. Všechny použité komponenty až na konektory jsou v technologii SMD. Kompletní schéma a výrobní podklady pro tuto desku lze nalézt v přílohách.



Obr. 12 Řídící modul

5.3 Modul senzorů

Deska senzorů obsahuje senzory MQ-136 a MQ-137 od firmy Hanweii Electronis. Senzor SGP30 od firmy Sensirion a kombinovaný senzor teploty, vlhkosti a tlaku BME280 od firmy Bosch Sensortec. Celá tato deska je umístěna v měřicí komoře a s procesorovou deskou je propojena desetižilovým plochým kabelem. Osazenou desku senzoru lze vidět na obr. 13. Kromě zmíněných senzorů obsahuje také blokovací kondenzátory a konektor pro propojení s řídicím modulem. Rozměry této DPS jsou 75 mm x 65 mm. Schéma a výrobní podklady jsou umístěny v přílohách práce.

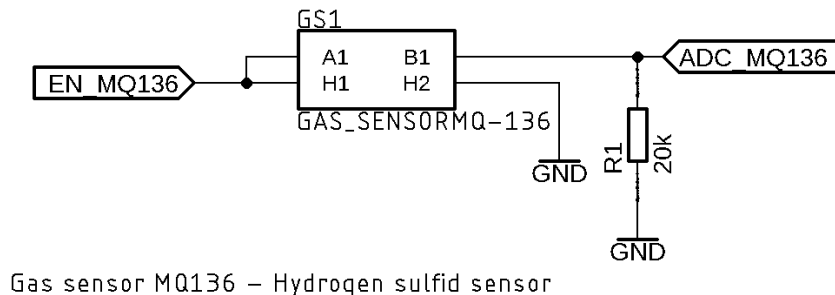


Obr. 13 Deska senzorů

5.3.1 Senzor MQ-136

Senzor MQ-136 je využíván pro snímání koncentrace sulfanu. Jde o levný polovodičový senzor od firmy Hanweii Electronics [24]. Umožňuje měřit koncentraci sulfanu v rozsahu od 1 ppm do 100 ppm. Jako aktivní vrstva se používá SnO_2 , která má nižší vodivost v čistém vzduchu. Pokud je přítomný sulfan, vodivost senzoru se zvyšuje.

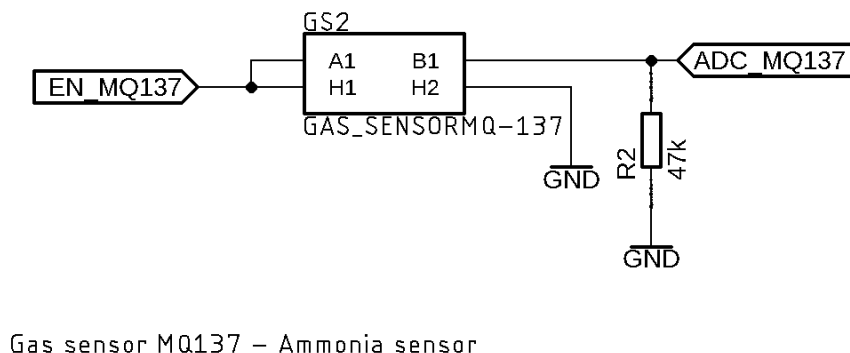
Senzor je vytvořen na keramické destičce z Al_2O_3 . Žhavicí vinutí tvoří Ni-Cr slitina, spotřeba žhavicího vinutí je přibližně 160 mA při napájení 5 V. Pouzdro senzoru je opatřeno šesti vývody. Dva vývody se využívají pro žhavení, zbylé čtyři jsou připojeny k aktivní vrstvě. Zapojení senzoru na obr. 14 vychází z doporučeného zapojení výrobce. Signál EN_MQ136 sepne topný element senzoru a signál ADC_MQ136 je přiveden na vstup A/D převodníku mikroprocesoru. Senzor není kalibrovaný a jeho data nejsou proto v ppm, ale pouze jako číslo získané z A/D převodníku. Jelikož zařízení porovnává své měření, není nutné znát absolutní množství.



Obr. 14 Zapojení senzoru MQ136

5.3.2 Senzor MQ-137

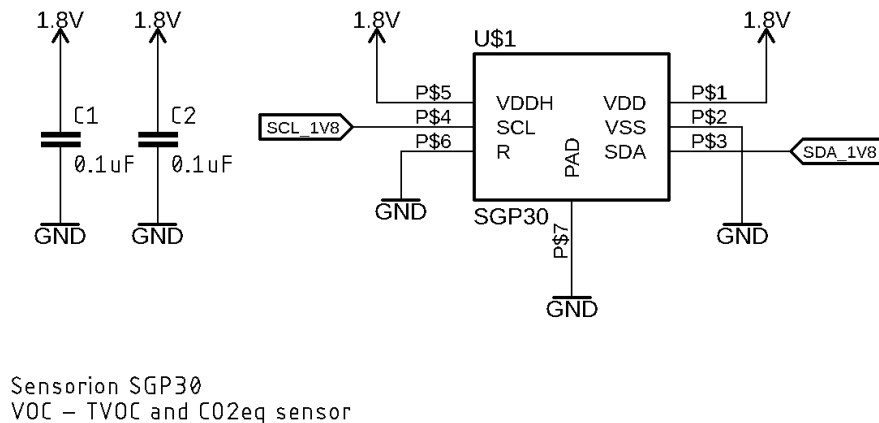
Senzor MQ-137 je využíván pro snímání koncentrace amoniaku od firmy Hanwei Electronics[25]. Jde o relativně levný, polovodičový senzor. Umožňuje měřit koncentraci amoniaku v rozsahu od 5 ppm do 200 ppm. Jako aktivní vrstva se používá SnO_2 . Konstrukce senzoru je podobná senzoru MQ-136. Způsob připojení je tak stejný jako u senzoru MQ-136. Zapojení senzoru lze vidět na obr. 15. Signál EN_MQ137 spíná topný element senzoru a výstup senzoru ADC_MQ137 je zpracován A/D převodníkem mikroprocesoru. Ani tento senzor není kalibrovaný a platí informace uvedené u předchozího senzoru.



Obr. 15 Zapojení senzoru MQ137

5.3.3 Senzor SGP30

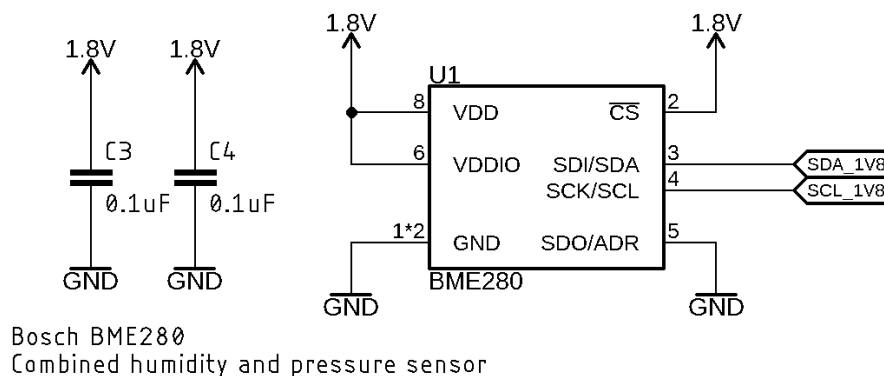
Tento senzor je využit pro snímání koncentrace TVOC a také dokáže nepřímo měřit CO₂ za pomoci měření koncentrace vodíku. Senzor obsahuje čtyři snímací elementy v jednom pouzdře. Tyto elementy jsou citlivé na VOC a vodík. Snímač měří celkovou koncentraci TVOC a vypočítá koncentraci CO₂ z naměřené koncentrace vodíku. Je vybaven algoritmem pro dynamickou korekci základní úrovně [26]. Na rozdíl od senzorů MQ je tento senzor v průběhu výroby kalibrován. Měřené hodnoty tento senzor poskytuje pomocí sběrnice I²C. Jeho spotřeba při měření je pouze 48 mA při napětí 1,8 V [26]. Je v 6 pinovém pouzdru DFN s rozměry 2,45 mm x 2,45 mm. Zapojení vychází z katalogového listu součástky a lze jej vidět na obr. 16.



Obr. 16 Zapojení senzoru Sensirion SGP30

5.3.4 Senzor BME280

Pro měření teploty, vlhkosti a atmosférického tlaku je použit senzor Bosch BME280 [27]. Je využíván pro kompenzaci měřených dat ze senzoru SGP30. Pro komunikaci tento senzor využívá sběrnici I²C. Dosahuje přesnosti měření teploty 0,5 °C a při měření vlhkosti ± 3% RH. Napájecí napětí se může pohybovat v rozmezí 1,7 V až 3,6 V, spotřeba se pohybuje v jednotkách µA. Lze jej provozovat v rozsahu teplot – 40 °C až 85 °C, rozsah měřené vlhkosti se může pohybovat v rozmezí 0 až 100 % vzdušné vlhkosti. Rozlišovací schopnost senzoru je 0,01 °C a 0,008 % vzdušné vlhkosti. Zapojení senzoru je patrné z obr. 17



Obr. 17 Zapojení senzoru BME280

5.4 Desky plošných spojů

Návrh desek plošných spojů probíhal za pomoci softwaru Eagle. Až na senzory SGP30 a BME280, které mají relativně malá pouzdra, což zvyšuje nároky na výrobu a osazení DPS, obsahuje deska již jen součástky v amatérských podmínkách jednoduše osaditelné, jako jsou SMD rezistory a kondenzátory v rozměru 0603 a součástky v pouzdrech SOT-23, SOT-223, SO-8 a THT konektory.

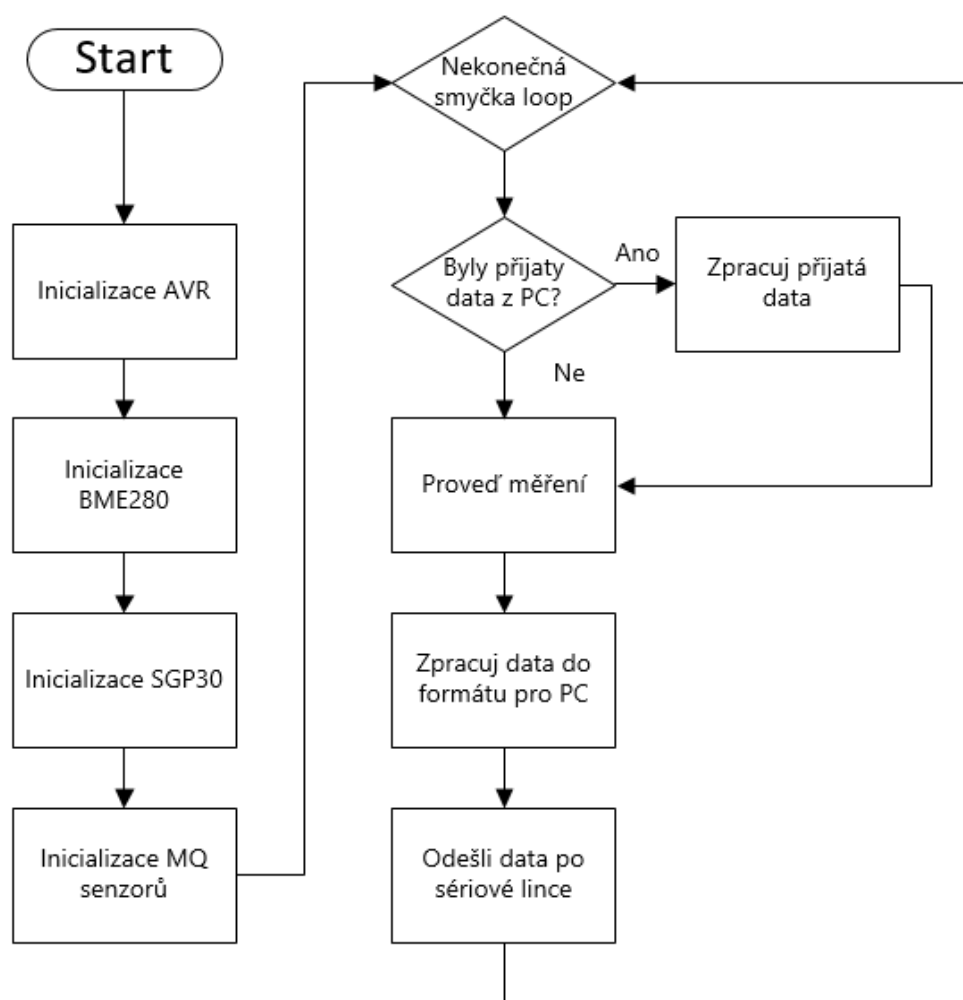
Obě DPS jsou vyrobené jako dvouvrstvé na základním materiálu FR-4 s nepájkivou maskou a povrchovou úpravou HAL. Výroba DPS probíhala v Číně vzhledem k nízkým cenám a rychlému dodání. Jeden kus DPS vyšel i s poštovním zhruba na 30 Kč a celý proces od zadání zakázky po obdržení vyrobených DPS trval přibližně týden. Při poptávce kalkulace u lokální firmy byl odhad ceny za jeden kus DPS přibližně 500 Kč s dodací lhůtou podobnou jako u čínského výrobce.

6. PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ

Tato kapitola popisuje programové vybavení mikroprocesoru a program pro PC.

6.1 Programové vybavení řídicího modulu

Program pro mikroprocesor je psaný v jazyce Wiring ve vývojovém prostředí Arduino, přeložený kód je pak přímo z tohoto IDE za pomoci bootloaderu nahraný do mikroprocesoru. Základní běh programu popisuje vývojový diagram na obr. 18.



Obr. 18 Vývojový diagram programu mikroprocesoru

Po zapnutí mikroprocesoru dochází k inicializaci globálních proměnných a periférií. Jsou nastaveny vstupní a výstupní piny mikroprocesoru, proběhne nastavení UART sběrnice a jsou inicializovány jednotlivé senzory. Následně program vstoupí do hlavní

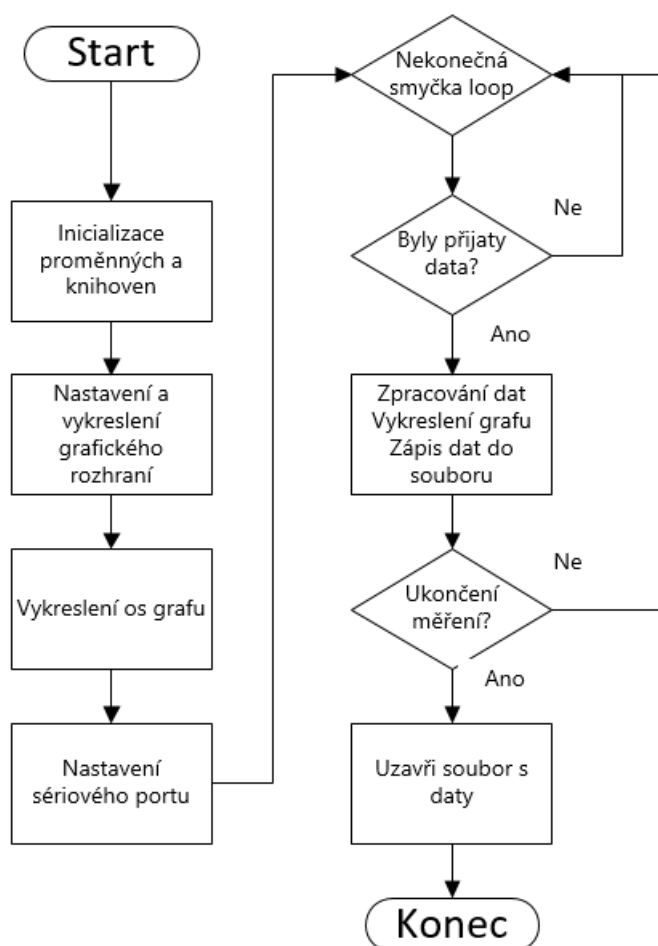
programové smyčky. Uvnitř této smyčky se testuje, zda byla obdržena konfigurační data, pomocí kterých se dá nastavit rychlost vzorkování.

Pokud nebyla z PC přijata žádná konfigurační data, spustí se měření s výchozími hodnotami. Postupně jsou změřeny jednotlivé hodnoty ze senzorů a zpracovány do řetězce, který je odeslán pomocí sběrnice UART do počítače.

V programu je využito několik volně dostupných knihoven. Jde o knihovny EEPROM pro ovládání interní EEPROM paměti, která slouží k uložení kalibračních konstant senzorů. Pro obsluhu senzorů Bosch BME280 a Sensirion SGP30 jsou využity knihovny od firmy Adafruit, které jsou šířeny pod licencí BSD, dostupné z [28] a [29].

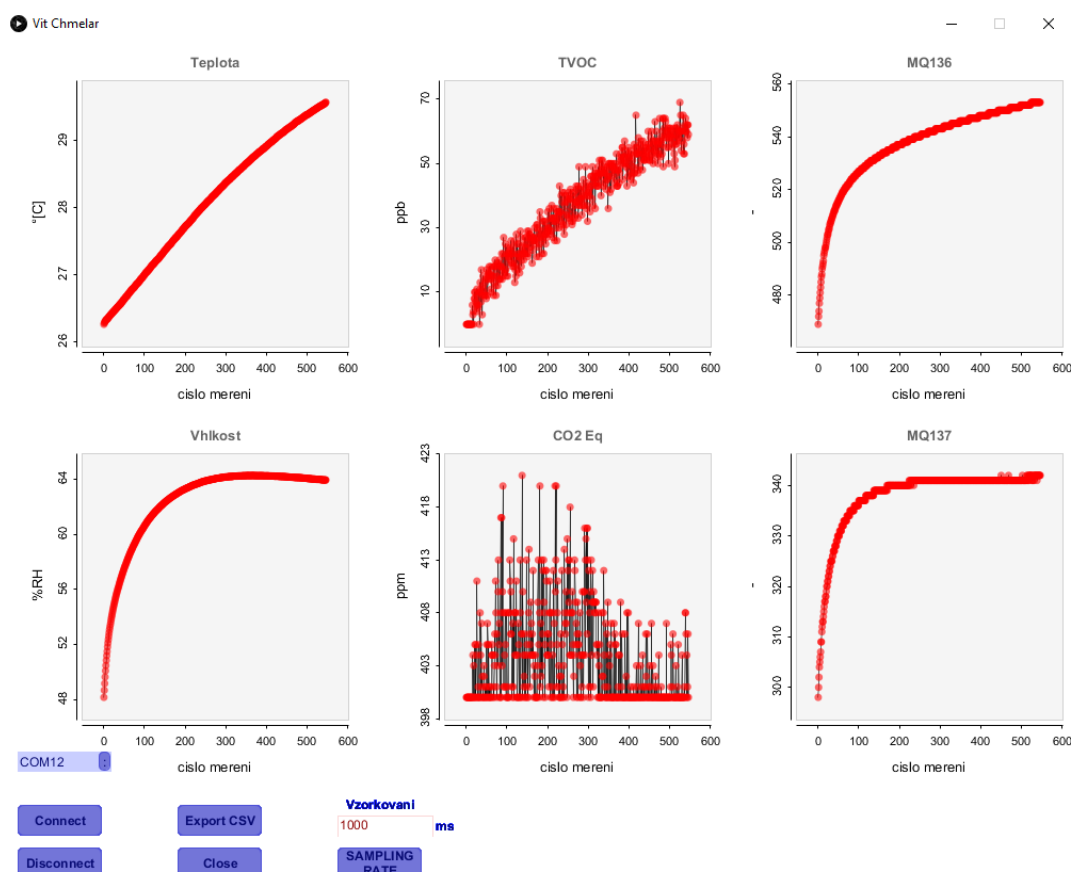
6.2 Program pro PC

Program vytvořený v prostředí Processing, který umožňuje ovládání a zobrazení měřených dat z konstruovaného zařízení. Prostředí Processing je založeno na jazyce Java. To umožňuje obecně multiplatformnost programu. Vyvíjený program byl vytvořen na počítači třídy PC s operačním systémem Windows a jiné OS nebyly odzkoušeny. Vývojový diagram na obr. 19 popisuje základní běh počítačového programu.



Obr. 19 Vývojový diagram PC programu

Program umožňuje ukládání naměřených dat ve formátu CSV a jejich zobrazení ve 2D grafech v reálném čase. Po spuštění je zobrazeno grafické prostředí s grafy a ovládacími prvky viz obr. 20.



Obr. 20 Grafické rozhraní ovládacího programu

Ze seznamu dostupných COM portů je vybrán port s připojeným zařízením a pomocí tlačítka Connect je navázána komunikace s mikroprocesorem a zahájen přenos dat do PC. Po skončení měření lze komunikaci ukončit tlačítkem Disconnect. Při zahájení měření je v adresáři programu vytvořen soubor data.csv, do kterého jsou během měření ukládány měřené hodnoty. Další ovládací prvek, tlačítko Export CSV umožňuje export měřených dat do souboru ve formátu CSV a správné uzavření datového souboru. Použití souboru typu CSV umožňuje jednoduché zpracování v dalších programech, např. Microsoft Excel. Jako oddělovač hodnot je použit středník. Formát dat souboru je zobrazen v tabulce 2.

Tabulka 2 Struktura CSV souboru

Číslo měření	Teplota [°C]	Vlhkost [%RH]	TVOC [ppb]	eCO ₂ [ppm]	MQ136[-]	MQ137[-]
1	30.04	41.02	53	567	692	503

Tlačítko Close provede korektní ukončení měření a zavření programu. V případě potřeby lze změnit čas vzorkování, do textového pole je zadán požadovaný vzorkovací čas a po stisku tlačítka Sampling rate je tato hodnota odeslána do zařízení, kde proběhne změna vzorkovacího intervalu.

Všechny grafy zobrazené v GUI jsou interaktivní, pomocí kolečka myši lze jednotlivé grafy přibližovat a oddalovat. Při držení pravého tlačítka se lze pohybovat v osách X-Y. Rozsah hodnot os X-Y je automaticky nastavován podle velikosti měřených hodnot.

V programu jsou využity volně dostupné knihovny Grafica [30] a G4P [31]. Knihovna G4P je využita pro tvorbu grafického rozhraní programu, knihovna Grafica je využita pro tvorbu grafů.

6.3 Možnosti realizovaného zařízení

Vytvořené zařízení pracuje dostatečně a umožňuje monitorování degradačních procesů u živočišných materiálů. Není však dokonalé a v porovnání s komerčně dostupnými zařízeními má své nedostatky.

V porovnání s komerčním zařízením Peres je jeho použití komplikovanější, což je způsobené složitějším vyhodnocováním měřených dat. Bylo by vhodné v programu pro PC vytvořit databázi jednotlivých živočišných produktů a určit hranice měřených hodnot, které jsou pro člověka ještě bezpečné. Tato databáze by pak zjednodušovala zpracování naměřených dat a jejich vyhodnocení.

Nevýhodou zařízení je také nízký počet použitých senzorů. Profesionálně dostupné elektronické nosy obsahují desítky senzorů, které jim poskytují možnost detekce různorodých látek. Dalším možným problémem který by se mohl vyskytnout je materiál měřící komory. Plast není úplně nejvhodnějším materiálem, může absorbovat měřené plyny a naopak se z něj mohou uvolňovat látky měření ovlivňující. Tento problém by se dal vyřešit konstrukcí měřící komory ze skla.

7. MĚŘENÍ VZORKŮ

Po odladění funkčnosti zařízení bylo přistoupeno k samotnému měření živočišných materiálů. Pro měření byly zvoleny dva vzorky: kuřecí maso a mléko. V práci je rozvedeno pouze měření mléka, další měření je uvedeno v přílohách práce.

Z měření lze vyvodit, že pokud nepřesáhnou hodnoty určitou hranici, lze živočišný materiál považovat za vhodný ke konzumaci. Dle měření mléka a kuřecího masa lze hranici bezpečné potravinu určit jako hodnoty TVOC 500ppb, CO₂eq 600ppm, koncentrace sulfanu 600 a koncentrace amoniaku 500.

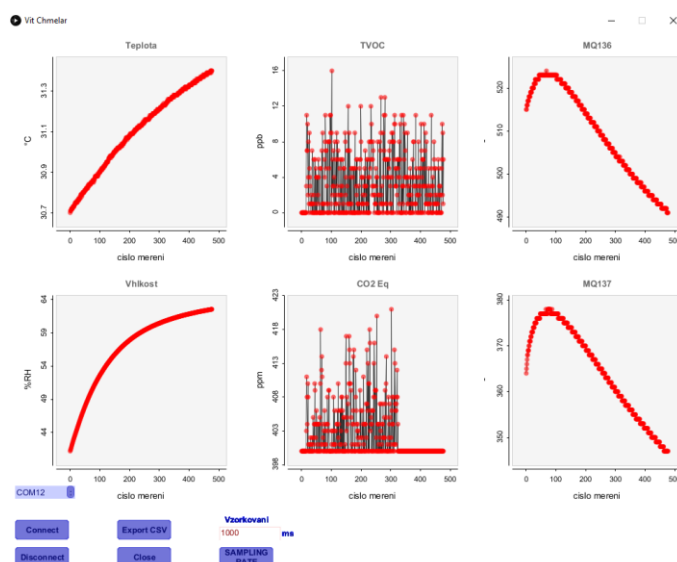
7.1 Postup měření

Při měření je nutné dodržet postup měření, který zajistí obdobné podmínky při všech měřeních. Před vložením vzorku je nutné zapnout zařízení, aby došlo k přehřátí chemorezistivních senzorů na pracovní teplotu. Tato doba byla určena experimentálně na 5 minut, kdy při měření pozadí dojde k ustálení hodnot. Následně je do zařízení vložen měřený vzorek. Je spuštěno samotné měření a po osmi minutách je měření ukončeno.

7.2 Měření vzorku mléka

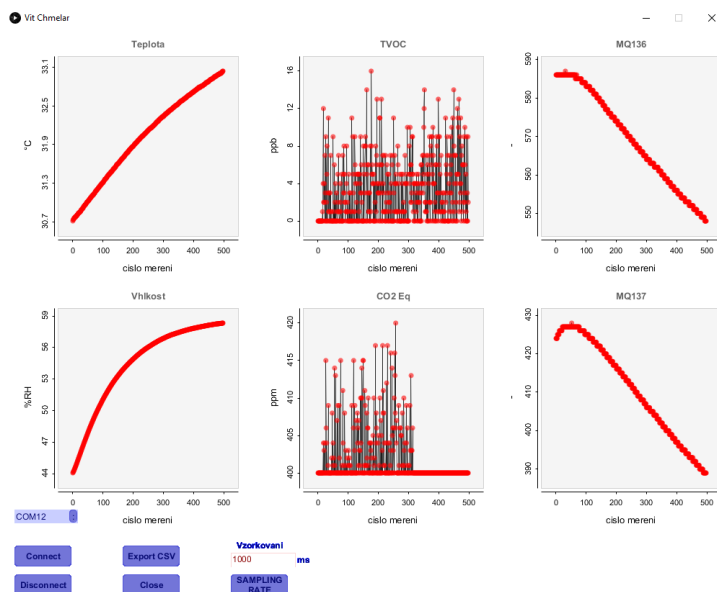
Proběhla čtyři měření vzorku mléka. Mléko bylo nalito do plastové misky, tato miska je umístěna do měřicí komory. Plocha pro odpar plynů této misky je 28 cm². První měření proběhlo po zakoupení mléka. Druhé měření proběhlo 5 hodin po zakoupení. Třetí měření bylo provedeno den po zakoupení mléka a čtvrté měření proběhlo 1,5 dne po zakoupení mléka. Mléko bylo skladováno při běžné pokojové teplotě pro urychlení degradačních procesů.

Výsledek prvního měření lze vidět na obr. 21. Druhé měření je na obr. 22. Třetí měření na obr. 23. Poslední měření se nachází na obr. 24.



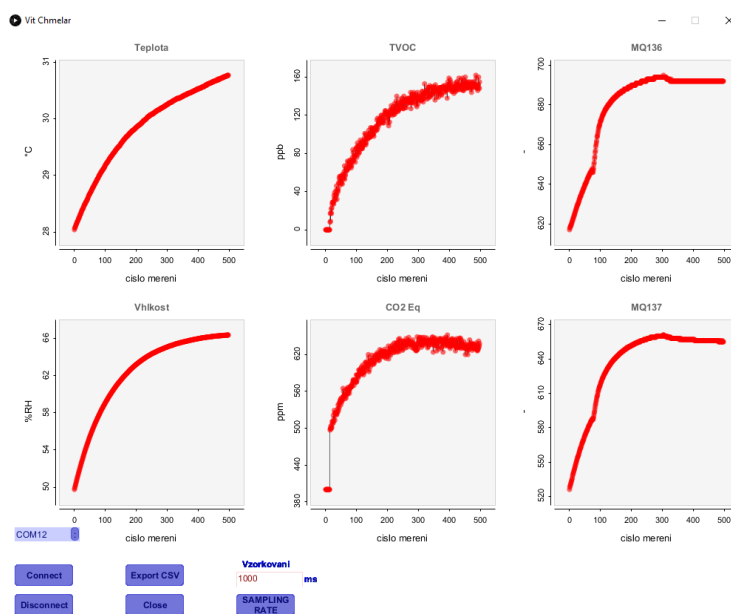
Obr. 21 Měření čerstvého mléka

Druhé měření již vykazuje zvýšené hodnoty sulfanu a amoniaku viz obr 22. Hodnoty TVOC a CO₂eq se téměř podobají měření prvnímu. Koncentrace sulfanu a amoniaku se zvýšila, což signalizuje probíhající degradační procesy. Po provedení senzorkého testování lze toto mléko považovat jako vhodné pro konzumaci, zápach lze stále považovat za přijatelný.

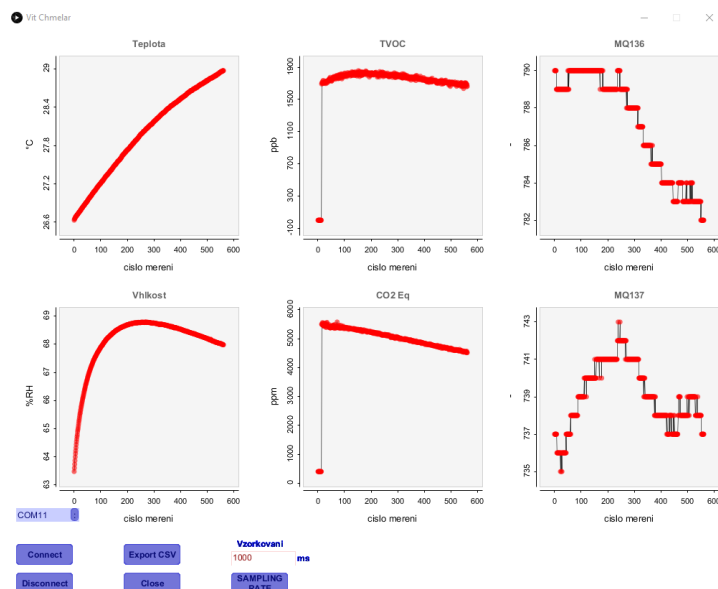


Obr. 22 Měření 5 hodin starého mléka

Při třetím měření mléko již silně zapáchá, již jej nelze doporučit ke konzumaci. Hodnoty TVOC a CO₂eq jsou oproti předchozím měřením vyšší. Koncentrace sulfanu a amoniaku se opět zvýšila. Viz obr. 23.



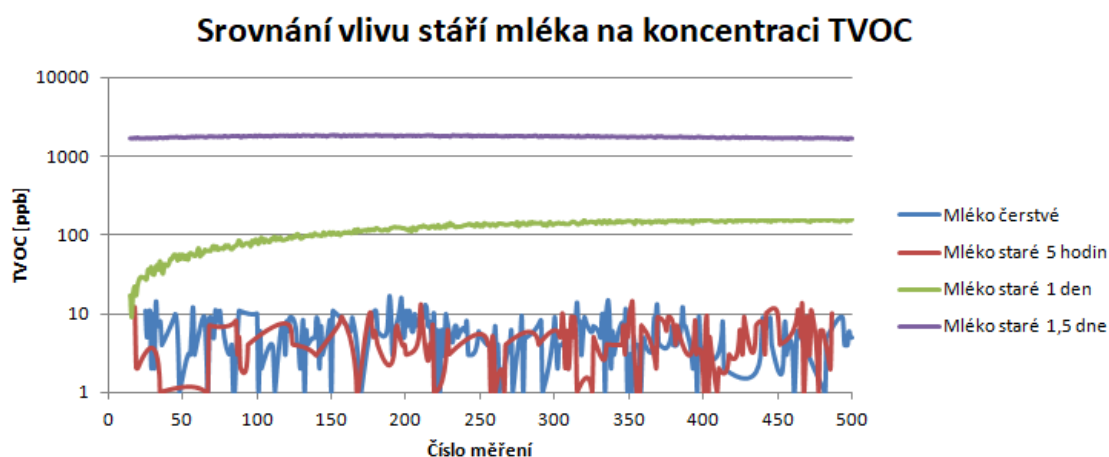
Obr. 23 Měření 24h starého mléka



Obr. 24 Měření 1,5 dne starého mléka

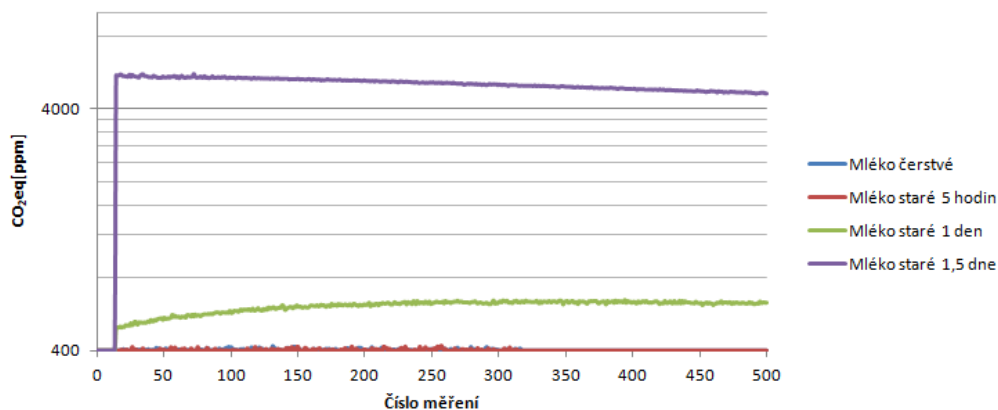
Poslední měření proběhlo po 36 hodinách od zakoupení mléka. Všechny měřené hodnoty se zvýšily. Nejlépe zřetelné je to na koncentraci TVOC a CO₂eq. Hodnota těkavých organických sloučenin se vůči předchozímu měření zvýšila téměř dvacetkrát. CO₂eq se oproti předchozímu měření zvýšila desetinásobně. Takto zkažené mléko již velmi silně zapáchá a po požití by mohlo vyvolat zdravotní komplikace.

Ze všech měření mléka byla vyexportována data ve formátu CSV, tyto data byla importována do programu Microsoft Excel a vytvořeny grafy srovnávající jednotlivé koncentrace měřených látek během rozkladu mléka. Lze je vidět na obr. 25 až obr. 28.



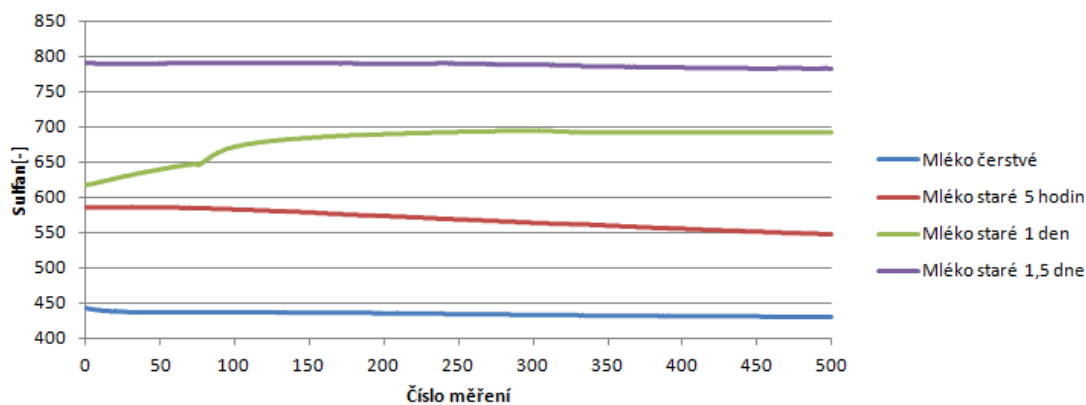
Obr. 25 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci TVOC

Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci CO_2eq



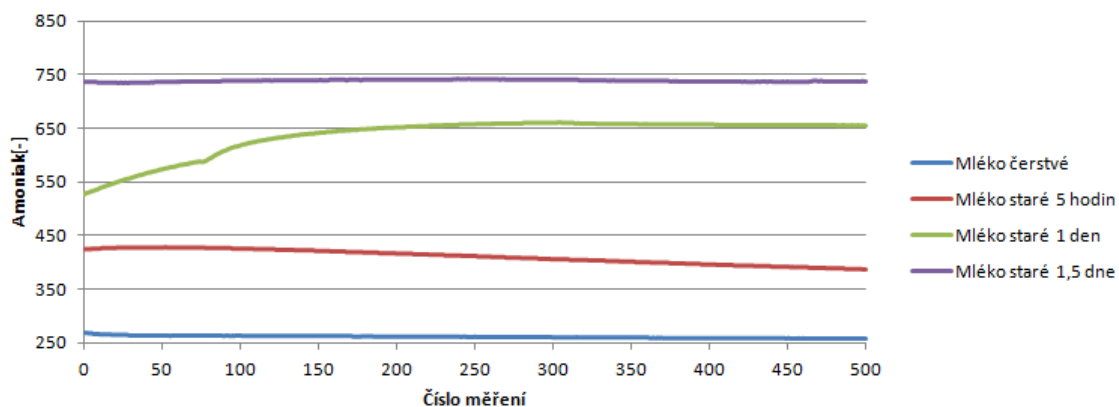
Obr. 26 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci CO_2eq

Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci sulfanu



Obr. 27 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci sulfanu

Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci amoniaku



Obr. 28 Srovnání vlivu stáří mléka na koncentraci mléka

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou degradačních procesů u materiálů živočišného původu. Pojednává také o senzorech pro monitorování plynů, z toho je dále vycházeno při návrhu zařízení pro monitorování degradačních procesů. Práce popisuje mikroprocesor ATmega328 a jeho programování.

Cílem práce byl návrh a realizace zařízení pro monitorování degradačních procesů u materiálů živočišného původu. To zahrnuje návrh hardwaru zařízení, vývoj softwaru pro mikroprocesor ATmega328 použitý v zařízení a také vývoj softwaru pro PC, který umožňuje zobrazení naměřených dat a jejich další zpracování.

V návrhové části práce jsou přiblíženy parametry jednotlivých snímačů a periferních obvodů. Byly vytvořeny desky plošných spojů pro řídicí modul a desku senzorů. Dále byl vytvořen program pro mikroprocesor, který obsluhuje jednotlivé snímače a umožňuje odeslání měřených dat do počítače k dalšímu zpracování. Byla vytvořena aplikace pro počítač, která zobrazuje naměřená data a jejich export, umožňující zpracování v jiných programech.

Zařízení umožňuje měření koncentrace sulfanu, amoniaku, organických těkavých látek, ekvivalentní hodnotu oxidu uhličitého, teplotu a vlhkost.

Výsledkem práce je funkční prototyp zařízení, který umožňuje experimentální monitorování odcházejících plyných produktů degradačních procesů u materiálů živočišného původu. Celkové náklady na zařízení jsou přibližně 2400 Kč. Příznivá cena zařízení je vyvážena kompromisem v použitých senzorech pro snímání koncentrace sulfanu a amoniaku.

Vhodné senzory, které jsou z výroby kalibrované a mají kompenzaci stárnutí citlivé vrstvy, ale svojí cenou několikanásobně převyšují cenu celého zařízení. Dalším možným vylepšením by byla úprava programu pro jednodušší vyhodnocování jednotlivých měření a vhodnější materiál použitý pro konstrukci měřicí komory

LITERATURA

- [1] PREEDY, V. a RODRÍGUEZ MÉNDEZ M. L. Electronic noses and tongues in food science. Tokyo: Academic Press, [2016]. ISBN 978-0-12-800243-8.
- [2] NEWPORT, A. Coming up for Air. In: Beef magazine [online]. 2006, 1 Apr 2006 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.beefmagazine.com/mag/beef_coming_air
- [3] PROKEŠ, L. Posmrtné změny a jejich význam při interpretaci pohřebního ritu: (ke vztahu mezi archeologií a forenzními vědami). 1. Brno: ÚAM FF MU, 2007. Archaeologia mediaevalis Moravica et Silesiana. ISBN 978-80-239-9599-2.
- [4] Electronic nose. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electronic_nose
- [5] RÖCK, Frank, Nicolae BARSAN a Udo WEIMAR. Electronic Nose: Current Status and Future Trends. *Chemical Reviews*. 2008, **108**(2), 705-725. DOI: 10.1021/cr068121q. ISSN 0009-2665. Dostupné také z: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr068121q>
- [6] PERIS, Miguel a Laura ESCUDER-GILABERT. A 21st century technique for food control: Electronic noses. *Analytica Chimica Acta*. 2009, **638**(1), 1-15. DOI: 10.1016/j.aca.2009.02.009. ISSN 00032670. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0003267009002268>
- [7] ZNose Series. *CBRNE Tech Index* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.cbrnetechindex.com/P/4362/Electronic-Sensor-Technology-Inc/zNose-Series>
- [8] KNIBS, Kate. Peres: This electronic nose could save you from food poisoning. *The Daily Dot* [online]. 2014, 2014 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://www.dailydot.com/debug/peres-food-poisoning-killer/>
- [9] GABLECH, I. Polovodičové senzory plynů na bázi oxidu cíničitého [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83029. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Prášek, Ph.D.
- [10] HUBÁLEK J., DRBOHLAVOVÁ J., PRÁŠEK J., BUŠINOVÁ P. a BENDO VÁ M. Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy [online]. 1. Brno, 2012 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/absn/fileskripta_mikrosenzory_hubalek.pdf
- [11] PYTLÍČEK, Z. Senzory plynů, jejich konstrukce a testování [online]. Brno, 2010 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30091. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Prášek, Ph.D.

- [12] VENKRUBEC, L. Chemorezistivní senzor plynů [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=149049.
 Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Jan Prášek, Ph.D.
- [13] ASHRAK, K. et al. A review of gas sensors employed in electronic nose applications [online]. Sensor Review, 2004, č. 24, s 181 - 198. Dostupné z:
<http://saba.kntu.ac.ir/eecd/ecourses/inst%2086/Projects/Electronic%20Nose/final%20atas%20hzar/New%20Folder/Emerald%20FullText%20Article%20%20A%20review%20of%20gas%20sensors%20employed%20in%20electronic%20nose%20applications.htm>
- [14] CHMELÁŘ, V. Řídicí jednotka pro monitorování klimatických podmínek u chovu jedlého hmyzu [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=152597.
 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Ing. Martin Adámek, Ph.D.
- [15] MegaAVR® Data Sheet [online]. Microchip Technology, 2018 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega48A-PA-88A-PA-168A-PA-328-P-DS-DS40002061A.pdf>
- [16] Building a project with AVR Studio. In: Pololu [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://a.pololu-files.com/picture/0J366.600.jpg?2ab389bea586028989bc42170fbef673>
- [17] Bootloader v mikrokontrolérech AVR. UART.CZ [online]. 2012, 29.11.2012 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://uart.cz/721/bootloader-v-avr/>
- [18] TIŠNOVSKÝ, P. Externí sériové sběrnice SPI a I²C. In: Root [online]. 2008 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/>
- [19] History of the I2C Bus. Embedded Systems Academy [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.esacademy.com/en/library/technical-articles-and-documents/miscellaneous/i2c-bus/general-introduction/history-of-the-i2c-bus.html>
- [20] I2C Background. In: Total Phase [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.totalphase.com/support/articles/200349156-I2C-Background>
- [21] OLEJÁR, M. Stručný popis sběrnice I2C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877. In: Hw.cz: vše o elektronice a automatizaci [online]. 2000 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/strucny-popis-sbernice-i2c-a-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojeni-externi-eeeprom-24lc256>
- [22] Arduino Nano pinout. In: EPro Labs [online]. 2016 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://wiki.eprolabs.com/index.php?title=File:Nano.jpg>

- [23] https://www.tme.eu/Document/f31fae6262e23b19f4958be8c3ae4d61/AP2146_56.pdf
- [24] MQ-136 GAS SENSOR. HANWEI ELECTRONICS CO [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <http://www.sensorica.ru/pdf/MQ-136.pdf>
- [25] MQ-137 GAS SENSOR [online]. HANWEI ELECTRONICS CO [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://eph.ccs.miami.edu/precise/GasSensorSpecs/NH3.pdf>
- [26] Datasheet SGP30 [online]. Sensirion [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://www.mouser.com/ds/2/682/Sensirion_Gas_Sensors_SGP30_Datasheet_EN-1148053.pdf
- [27] BME280: Combined humidity and pressure sensor [online]. Bosch, 2015 [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/BST-BME280_DS001-10.pdf
- [28] Adafruit BME280 Library [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://github.com/adafruit/Adafruit_BME280_Library
- [29] Adafruit SGP30 Gas/ Air Quality I2C sensor Library [online]. [cit. 2019-02-05]. Dostupné z: https://github.com/adafruit/Adafruit_SGP30
- [30] CARPIO, Javier Graciá. *Grafica library* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://jagracar.com/grafica.php>
- [31] LAGER, Peter. G4P. *Quarks place* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <http://www.lagers.org.uk/g4p/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

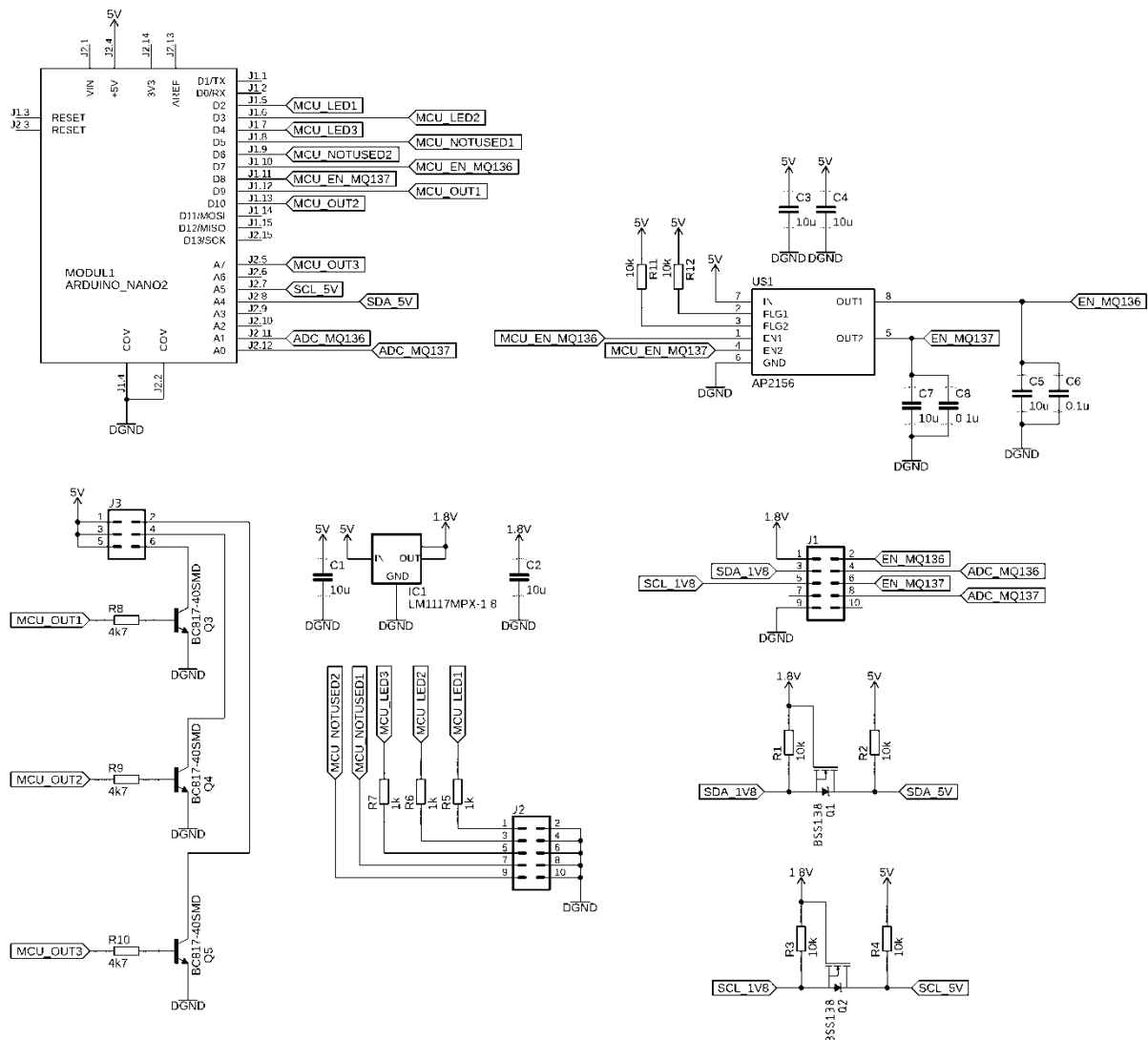
NH ₃	Amoniak
H ₂ S	Sulfan
SO ₄	Síran
VOC	Volatile Organic Compound
TVOC	Total Volatile Organic Compound
CO ₂	Oxid uhličitý
CH ₄	Metan
SO ₂	Oxid siřičitý
RISC	Reduced Instruction Set Computing
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
USART	Universal Synchoronous / Asynchronous Reciever and Transmitter
SPI	Serial Peripheral Interface
TWI	Two Wire Interface
ISP	In-System Programming
COM	Communication Port
OS	Operating System
IDE	Integrated Developement Enviroment
CSV	Comma-separated values

SEZNAM PŘÍLOH

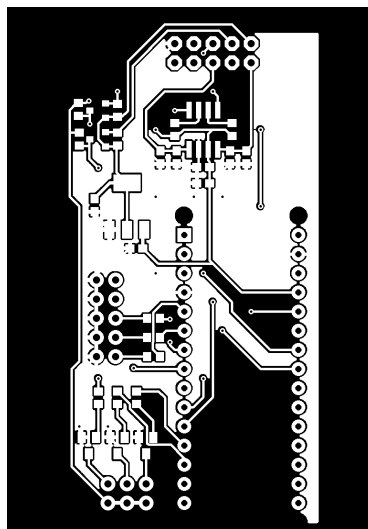
A.	Návrh zařízení.....	44
A.1	Obvodové zapojení řídicího modulu.....	44
A.2	Deska plošného spoje řídicího modulu – top (strana součástek).....	45
A.3	Deska plošného spoje řídicího modulu – bottom (strana spojů).....	45
A.4	Osazovací plán desky řídicího modulu	46
A.5	Obvodové zapojení desky senzorů.....	47
A.6	Deska plošného spoje desky senzorů – top (strana součástek)	47
A.7	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů).....	48
A.8	Osazovací plán desky senzorů	48
B.	Přílohy na CD	49

A. NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení řídicího modulu

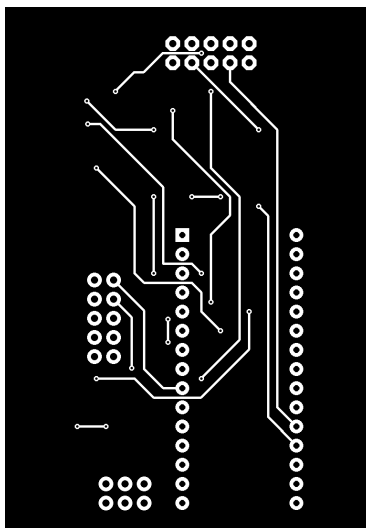


A.2 Deska plošného spoje řídicího modulu – top (strana součástek)



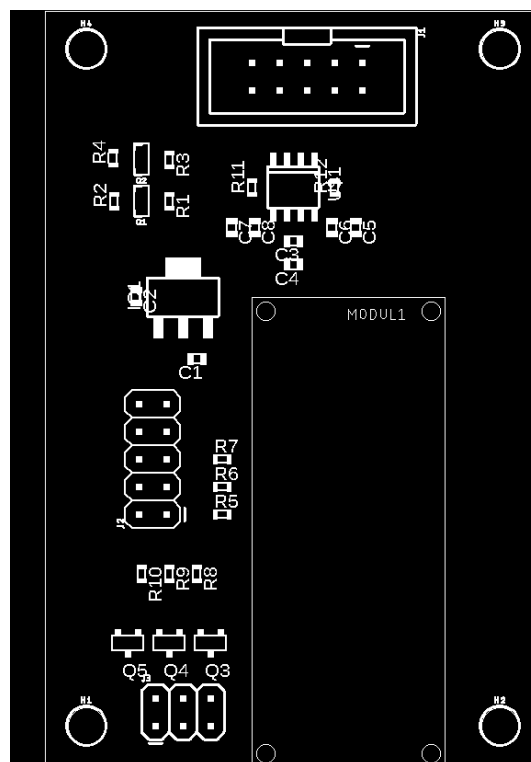
Rozměr desky 48,8 mm x 69,5 mm , měřítko M1:1

A.3 Deska plošného spoje řídicího modulu – bottom (strana spojů)

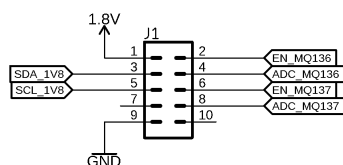
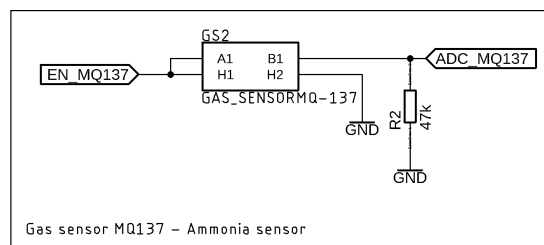
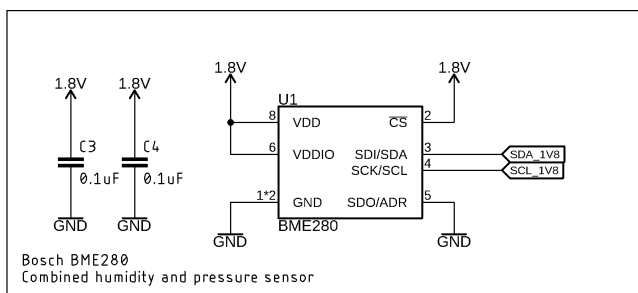
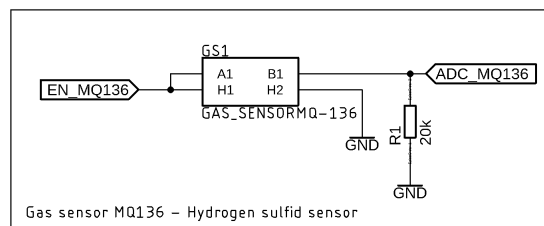
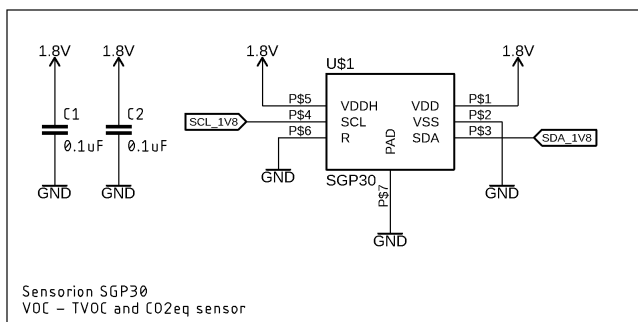


Rozměr desky 48,8 mm x 69,5 mm , měřítko M1:1

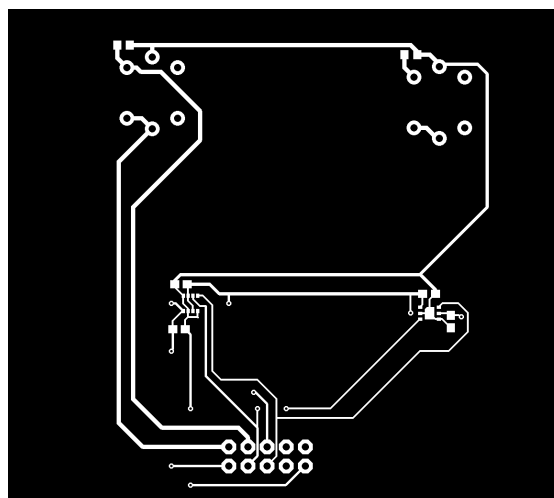
A.4 Osazovací plán desky řídicího modulu



A.5 Obvodové zapojení desky senzorů

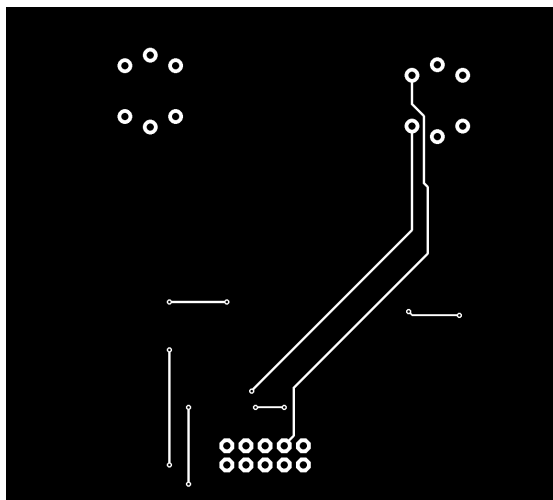


A.6 Deska plošného spoje desky senzorů – top (strana součástek)



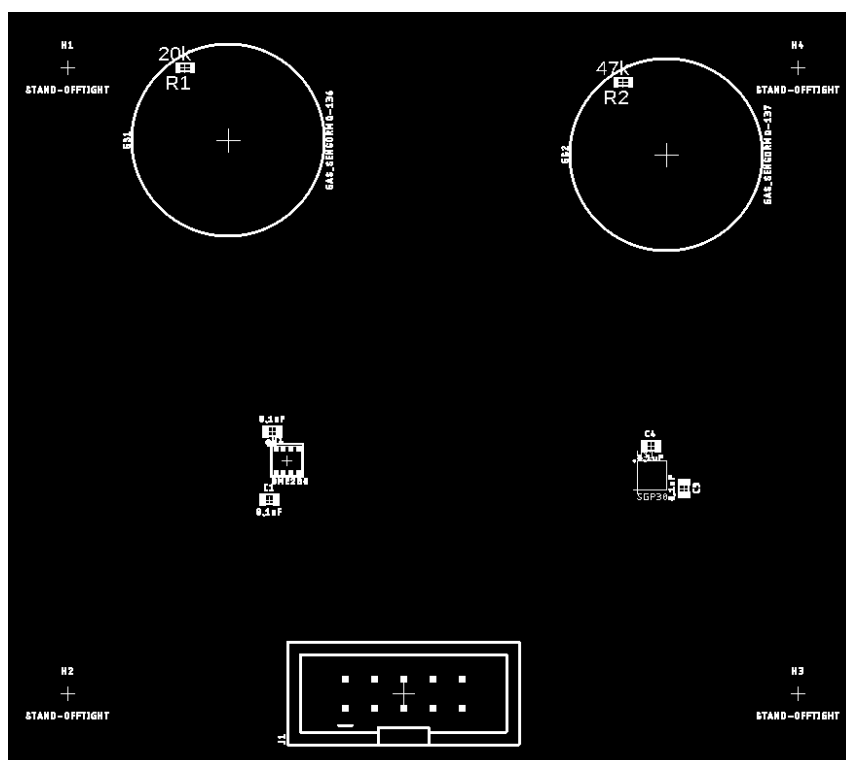
Rozměr desky 73,6 mm x 65,7 mm , měřítko M1:1

A.7 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 73,6 mm x 65,7 mm , měřítko M1:1

A.8 Osazovací plán desky senzorů



B. PŘÍLOHY NA CD

- Elektronická verze práce
- Výrobní podklady DPS v programu Eagle
- Zdrojový kód mikroprocesoru
- Zdrojový kód aplikace na PC
- Měřená data jednotlivých vzorků