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

PROGRAM PRO ANALÝZU PACHŮ PRO JEDNODUCHÝ ELEKTRONICKÝ NOS

ODOR ANALYSIS PROGRAM FOR SIMPLE ELECTRONIC NOSE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Pavla Janošíková
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Martin Adámek, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2020

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Studentka: Pavla Janošíková ***ID:*** 203570

Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Program pro analýzu pachů pro experimentální elektronický nos

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s možnostmi a využitím elektronického nosu. Dále se seznamte s metodami pro analýzu a rozpoznávání pachů pomocí elektronického nosu se zaměřením na potravinářství.
Realizujte program pro analýzu a rozpoznání vybraných pachů v potravinářství, který bude spolupracovat s funkčním vzorkem experimentálního elektronického nosu. Program musí dále umožnit příjem a uložení dat a výsledků do vedoucím zadaných formátů. Proveďte experimentální měření pro ověření funkčnosti programu a následný experiment pro porovnání výsledků rozpoznání vytvořeného programu s lidským nosem. Zhodnoťte Vaše řešení a jeho možnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 3.2.2020 ***Termín odevzdání:*** 8.6.2020

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

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:
Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Tato práce se zabývá zpracováním dat přijatých ze senzorického zařízení známého jako elektronický nos. Práce seznamuje s možnostmi provedení elektronických nosů a s nejznámějšími typy analýz určených k rozpoznávání pachů, které se používají v potravinářství.

Práce je zaměřena na analýzu hlavních komponent a vytvoření programu, který zpracovává data z jednoduchého elektronického nosu. Program data nejen přijímá, ale i ukládá a dále zpracovává pro lepší přehlednost výsledků. Pomocí programu je možné vytvořit databázi vzorků a určit neznámý vzorek, pokud je již v uložen v databázi.

Součástí práce je experiment, který má za úkol zjistit, jestli je vytvořený program schopný lépe rozpoznat určité pachy než lidský nos.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektronický nos, senzory plynů, analýza hlavních komponent, vůně, c#

ABSTRACT

This work deals with processing data acquired from sensory device known as electronic nose. The work introduces readers to a few possible designes of electronic noses and to some of the best known analysis for odor recognition that are used in food industry.

The work focus on a principal component analysis and a creation of program that process data from a simple electronic nose. The program not only receives data, but it even saves them and process them for better clarity of results. Using this program it is possible to create a new database and identify an unknown sample if its data are already stored in database.

The part of this work is an experiment to see if the created program is able to recognize some odors better then a human nose.

KEYWORDS

Electronic nose, gas sensors, principal component analysis, odors, c#

JANOŠÍKOVÁ, P. *Program pro analýzu pachů pro jednoduchý elektronický nos*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2019. 42 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Martin Adámek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Pavla Janošíková
VUT ID studenta:	203570
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2019/20
Téma závěrečné práce:	Program pro analýzu pachů pro jednoduchý elektronický nos

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.
Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

.

V Brně dne: 8. června 2019

……
Podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

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

OBSAH

Úvod **1**

1 Vnímání pachů **2**

1.1 Lidský nos ... 2

2 Způsoby měření pachů **3**

2.1 Olfaktometrická metoda ... 3

2.2 Dotazníková šetření ... 3

2.3 Měření v pachové stopě ... 3

2.4 Elektronický nos ... 3

3 Analýza plynů **5**

3.1 Hmotnostní spektrometrie ... 5

3.2 Infračervená spektrometrie ... 5

3.3 Plynová chromatografie ... 5

3.4 Analýza plynů pomocí elektronického nosu ... 5

4 Druhy senzorů pro elektronický nos **6**

4.1 Vodivostní senzory (chemorezistory) ... 6

4.2 Kapacitní senzory (chemokapacitory) ... 7

4.3 Chemodiody ... 7

4.4 Chemotranzistory ... 7

4.5 Teplotní chemické senzory ... 8

4.6 Gravimetrické (piezoelektrické) senzory ... 8

4.7 Optické chemické senzory ... 10

5 Metody zpracování dat ze senzorů **11**

5.1 Lineární diskriminační analýza ... 11

5.2 Korespondenční analýza ... 11

5.3 Shluková analýza ... 12

5.4 Analýza hlavních komponent ... 12

6 Redukce dimenzí pomocí PCA **14**

6.1 Odečtení průměru ... 14

6.2 Standardizace směrodatnou odchylkou ... 14

6.3 Výpočet kovarianční matice 14
6.4 Výpočet vlastních vektorů a vlastních hodnot kovarianční matice 14
6.5 Výběr hlavních komponent a formování funkčního vektoru 15
6.6 Odvození nového souboru dat 15

7 Elektronický nos použitý pro získání dat 16

8 Grafické zpracování naměřených dat 17

9 Návrh a realizace projektu pro zpracování dat 20

9.1 Vývojové prostředí 20
9.2 Jazyk C# 20
9.3 Accord.NET 21
9.4 Návrh projektu 21
9.5 Uživatelské rozhraní 22
9.6 Vytvoření databáze vzorků 22
9.7 Určení vzorku 24

10 Experimentální měření 26

11 Závěr 29

Příloha A – obsah CD 35

ÚVOD

Schopnost identifikovat různé pachy a vůně je velice užitečnou součástí lidských životů. Podle pachu je možné poznat zkažené jídlo a vyhnout se tak problémům s trávením, nebo zaregistrovat požár podle kouře a vyhnout se případné smrti. Ne všechny pachy však dokáže lidský nos zaregistrovat, některé plyny jsou bez zápachové, nebo je jejich množství velice malé a pro lidský nos nerozeznatelné. Pro tyto případy byly vyvinuty jednoduché plynové detektory - elektronické nosy. Kromě lidského bezpečí jsou však využívány např. v kosmetice, lékařství nebo v potravinářství, kde pomáhají k výrobě a kontrole kvality potravin, čímž šetří nemalé peníze. S jejich pomocí lze např. dále rozeznat falešné produkty, ať se jedná o potraviny, parfémy nebo léky.[1]

Elektronický nos může obsahovat více senzorů, protože každý senzor je citlivý jen na určitou látku nebo skupinu látek. Tím se ale zvyšuje i množství dat, které je potřeba vyhodnotit. Tato problematika se dá vyřešit pomocí analýzy hlavních komponent, která data zpracuje a graficky zobrazí.

Tato práce se zaměřuje na vytvoření programu, který by naměřená data z experimentálního elektronického nosu zpracoval pomocí analýzy hlavních komponent, zobrazil graficky a porovnal je s dalšími vzorky v databázi.

Práce v úvodu seznamuje s vnímáním pachů člověkem a jejich měřením. Na tuto část navazuje seznámení s analýzou plynů a senzory pro elektronické nosy. Následuje část o zpracování dat ze senzorů se zaměřením na analýzu hlavních komponent. V další části je metoda aplikována na testovací data z experimentálního elektronického nosu. Následující část popisuje návrh a realizaci programů pro zpracování dat z experimentálního elektronického nosu. Poslední část je věnována experimentálnímu měření a experimentu k porovnání rozpoznávání vzorků programem a lidským nosem.

1 VNÍMÁNÍ PACHŮ

Pro všechny živé organismy je životně důležité prozkoumávat chemické vlastnosti svého prostředí. Schopnost zaznamenávat a odpovídat na přítomnost chemických látek ve svém okolí se nazývá chemorecepce. Pomocí ní se převážně nižší organismy dokáží orientovat v prostředí. Čich je vyšší formou chemorecepce, kdy čichový orgán zachycuje molekuly pachu a ty se pak v mozku vyhodnocují. Další formou je chuť.

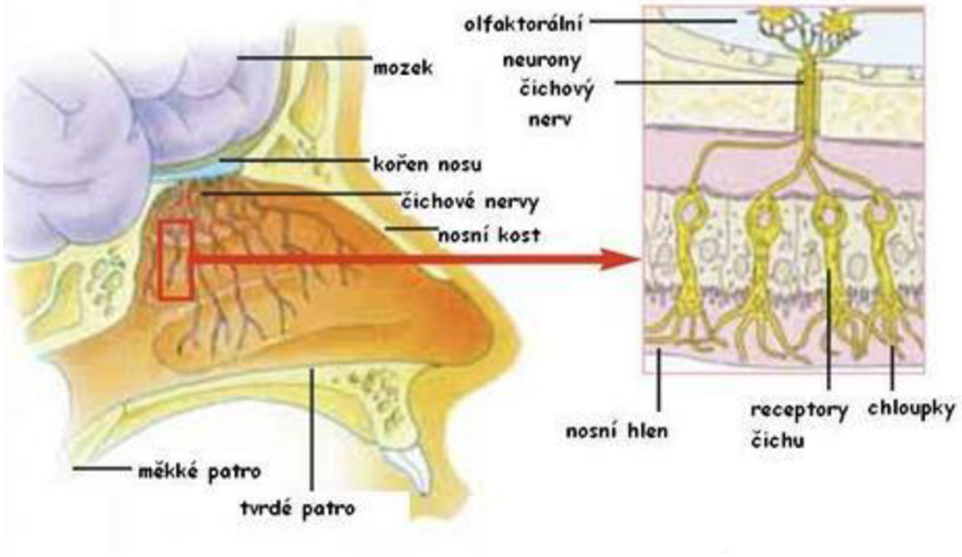
Zdrojem pachu bývají většinou složité směsi jednotlivých chemických látek. Pachové signály jsou proto hodně informačně nabité. Důležitým prvkem k vyhodnocení signálů bývá nejen složení směsi, ale také poměr jednotlivých látek. [2]

1.1 Lidský nos

Nos je smyslový orgán, pomocí kterého člověk rozeznává pachy. Při dýchání dále slouží k ohřívání, zvlhčování a čištění vzduchu vstupujícího do průdušnice a poté do plic.

Přestože čich patří k nejstarším smyslům, kterými člověk vnímá okolí (Obrázek 1), jedná se o jeden z nejméně prozkoumaných lidských smyslů. To pravděpodobně souvisí s tím, že se jedná o subjektivní vnímání. Určitý pach může někomu libě vonět a někomu naopak nelibě páchnout.

Člověk je schopen rozpoznávat zhruba 5 000 vůní, ale citlivost čichu je u každého jedince jiná. Oproti savcům má člověk čich málo vyvinutý. Například pes má povrch čichové sliznice kolem 100 – 150 cm^2, kdežto člověk pouze okolo 5 cm^2. Pes má proto daleko více chemických receptorů, pomocí může pachy detekovat a je více citlivý i na menší koncentrace chemických látek v ovzduší.[3]



Obrázek 1: Čichové ústrojí člověka. Převzato z [4]

2 ZPŮSOBY MĚŘENÍ PACHŮ

Důvodem ke stanovení pachových látek a k celkovému sledování pachů jsou mimo výrobu a zabezpečení, mohou být např. i stížnosti občanů na nežádoucí zápach v jejich okolí. Zdrojem tohoto zápachu může být např. živočišná prvovýroba.[5] Pro stanovení těchto pachů se může použít některá z metod uvedených níže.

2.1 Olfaktometrická metoda

Senzorická metoda, která využívá skupinu vybraných posuzovatelů k vyhodnocení pachů. Skupině se předloží vzorek neutrálního vzduchu (bez zápachu), do kterého byla v dané koncentraci přimíchána pachová látka. V současnosti se využívá olfaktometr s plně automatickým systémem, který zaznamenává odezvy skupiny. Koncentrace pachových látek jsou postupně zvyšovány a přístroj poté vyhodnotí hodnotu čichového prahu. Prahem je hodnota, kterou vyhodnotí 50% skupiny. Pro výběr členů skupiny i vzorku jsou přesně stanové kritéria normou ČSN EN 13725. [6]

Tato metoda se využívá například při hodnocení znečištění okolního ovzduší pachy ze skládky nebo z čističky odpadních vod.[7]

2.2 Dotazníková šetření

Využívají se názory respondentů, např. obyvatelů žijících v problematické oblasti, kteří jsou systematicky a opakovaně dotazováni na své pocity při vnímání pachu. U této metody je důležité počítat s tím, že ne všichni lidé dotazníky vypracují a odevzdají, čímž se může narušit výsledné statistické vyhodnocení.[6]

Tato metoda umožňuje získat velké množství dat, ale s málo podrobnými informacemi. Problémem též bývá subjektivita.

2.3 Měření v pachové stopě

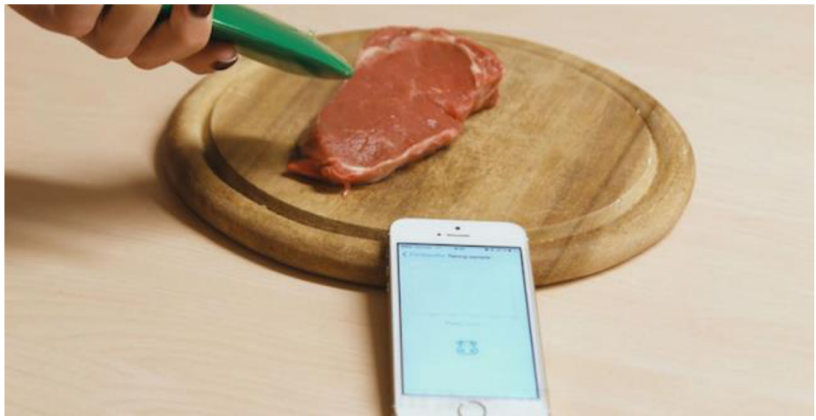
Tato metoda se používá pro zjištění okamžitého stavu. Skupina posuzovatelů přijde na stanoviště a hodnotí kvalitu ovzduší pravidelným vdechováním po určitou dobu. Přípustná míra obtěžování zápachem je překročena, když je zápach vnímán jako obtěžující určitým procentem obyvatel po určité procento sledované doby. Tyto procenta se liší podle místa (např. pro města a vesnice). Při jednorázovém měření nesmí koncentrace pachových látek překročit 3 pachové jednotky.[8]

2.4 Elektronický nos

Elektronický nos byl vyvinut k napodobení lidského nosu. Jedná se o zařízení, které umožňuje zhodnotit zkoumaný vzorek a vytvořit jeho digitální záznam. Lidský nos obsahuje až miliony receptorových buněk, naproti tomu elektronický nos obsahuje pouze pár jednotek až desítek senzorů. Elektronický nos je ale citlivější na menší

koncentraci látek a dokáže rozeznat pachy, které člověk ani nezaznamená. Pro rozpoznávání pachů však potřebuje databázi se vzorky k porovnání.[9]

V potravinářství se používají ke kontrole kvality potravin, což je důležité při jejich skladování i před konzumací (Obrázek 2). Například u ovoce se při dozrávání uvolňuje ethen, který vede k dalším chemickým reakcím, které dodávají ovoci sladkou chuť. Pokud ale ovoce přezrává, uvolňuje více ethenu a ten působí na okolní ovoce. Tím se spustí lavinová reakce, kdy veškeré ovoce dozrává rychleji, přezraje a pokazí se. Tak je to i u masa, které uvolňuje aminy a není-li správně a rychle zpracováno, může dojít k jeho zkažení.[10]



Obrázek 2: Kontrola kvality masa přenosným elektronickým nosem. Převzato z [11]

Další uplatnění nachází v oblasti bezpečnosti. Při hledání drog a bomb by mohli nahradit cvičené psy, jejichž trénink je časově i peněžně náročný a psi musí jít po čase do výslužby kvůli otupění čichu nebo závislosti na droze. Kromě toho by elektronické nosy mohli pomoci s vystopováním lidí pod lavinou nebo zavalené v troskách.[12]

V lékařství analýzou tělesných pachů jako je dech, zápach zranění nebo tělesné tekutiny může pomoci identifikovat případné problémy (Obrázek 3). Například zápach dechu může znamenat infekci ústní dutiny, dýchacích cest, diabetu a několika dalších onemocnění. Mezi nejdůležitější z tohoto oboru patří vývoj elektronického nosu, který by dokázal odhalit rakovinu plic v raném stádiu.[12]

Obrázek 3: Detekce rakoviny plic pomocí elektronického nosu. Převzato z [13]

3 ANALÝZA PLYNŮ

Ke zjištění přítomnosti plynných látek lze použít několik metod. Jako jednou z nejčastějších byla analýza pomocí plynové chromatografie, která je sice velice přesná, ale přístroje jsou obvykle drahé a těžko přenositelné a proto se používá pro laboratorní účely. Bylo tedy třeba přijít s přenositelným a cenově dostupnějším řešením. Tak vznikly elektronické nosy, které využívají chemické senzory.[14]

3.1 Hmotnostní spektrometrie

Tato metoda se používá pro určení hmotnosti částic nebo stanovení struktury vzorku. Princip je založen na ionizaci chemických sloučenin a rozlišení podle poměru hmotnosti a náboje. Vzorek je umístěn do přístroje a odpařen (pokud již není v plynném stavu). Ionty jsou děleny podle poměru hmotnosti a náboje v analyzátoru elektromagnetického pole, poté jsou detekovány a zpracovány hmotnostním spektrometrem.[15]

3.2 Infračervená spektrometrie

Tato metoda analyzuje infračervené záření, které interaguje s molekulou plynu. Měří se vibrace atomů a pomocí ní se určí funkční skupiny v molekule. Naměřené spektrum se porovnává se spektrem v databázi, protože každá molekula má svoje charakteristické spektrum.[16]

3.3 Plynová chromatografie

Separační metoda, která od sebe odděluje jednotlivé složky obsažené ve vzorku a které mohou být převedeny do plynné fáze bez toho, aby došlo k jejich rozkladu. Vzorek přeměněný na plyn se dávkuje do proudu plynu, který jej unáší kolonou. V koloně se složky separují na základě schopnosti různě silně se poutat se stacionární fází v koloně. Složky opouštějící kolonu indikuje detektor a z jeho signálu se vyhodnocuje druh vzorku a kvantitativní zastoupení složek ve vzorku.[17]

3.4 Analýza plynů pomocí elektronického nosu

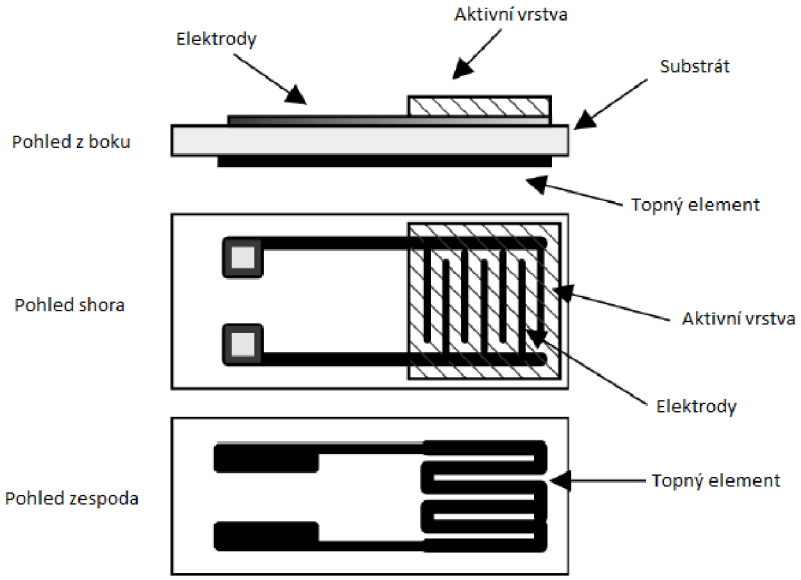
Nejdříve je nutné elektronický nos vytrénovat skupinou vzorků pro vytvoření databáze. Poté může přístroj rozpoznávat nové vzorky a porovnávat je s těmi, co už jsou v databázi. Tak se provádí kvalitativní (zjišťuje, jaké látky obsahuje a nezajímá ji množství) a kvantitativní (zjišťuje, kolik je určité látky ve vzorku) analýza. Problémem jsou pachy, které jsou tvořeny z více různých molekul, a elektronický nos je může chybně interpretovat. To má za následek chybné nebo nepřesné výsledky.[14]

Analýza je obvykle prováděna senzorickou analýzou pomocí chemických senzorů nebo plynovou chromatografií. Pro přenosný elektronický nos se však kvůli velikosti a ceně používají spíše senzory.[18]

4 DRUHY SENZORŮ PRO ELEKTRONICKÝ NOS

4.1 Vodivostní senzory (chemorezistory)

Principem těchto senzorů je změna elektrické vodivosti chemicky citlivé odporové vrstvy působením plynu (Obrázek 4). Vlivem chemisorpce dochází k vázání molekul plynu na povrch aktivní vrstvy chemickou vazbou, přičemž dochází k přenosu elektronů a aktivní vrstva mění svoji vodivost. Výsledný odpor je tak závislý na detekovaném plynu a jeho koncentraci. Výhodami těchto senzorů je jednoduchá konstrukce, dlouhá životnost, vysoká citlivost, nízká cena, jednoduchý provoz a malé rozměry (Obrázek 5). Jsou však velmi náchylné k interferenci s ostatními plyny a proto mohou v prostorách s více plyny spouštět falešné poplachy. Do jisté míry se to však dá vyřešit vhodnými filtry, které dokáží nežádoucí plyny zachytit.[19]

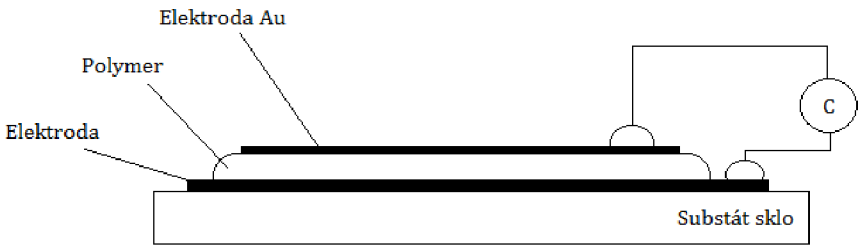


Obrázek 4: Struktura vodivostního senzoru. Převzato z [19]

Obrázek 5: Senzor na měření plynů na bázi vodivostního senzoru. Převzato z [20]

4.2 Kapacitní senzory (chemokapacitory)

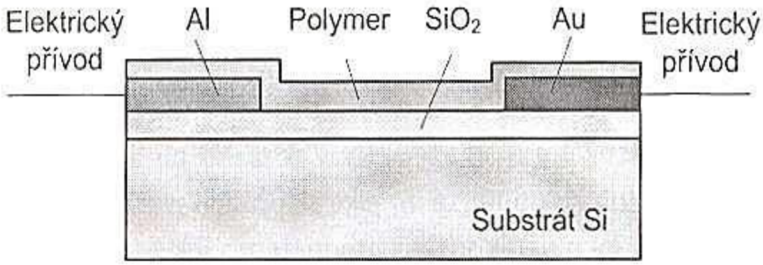
Principem činnosti je měření kapacity, kdy mezi dvě elektrody umístíme chemicky citlivou vrstvu (Obrázek 6), která je schopna rychle a vratně pohlcovat složky plynů a par a měnit tak svoji relativní permitivitu. Změny kapacity bývají velmi malé a závisí na pracovní frekvenci, okolní teplotě a vlhkosti. Výhodou těchto senzorů je mechanická odolnost (úplná a rychlá regenerace), rychlost odezvy, malé rozměry a velmi nízká spotřeba energie. Jsou ale teplotně závislé a náchylné na oxidaci elektrod. Často se využívají k měření vlhkosti.[19]



Obrázek 6: Struktura kapacitního senzoru. Převzato z [21]

4.3 Chemodiody

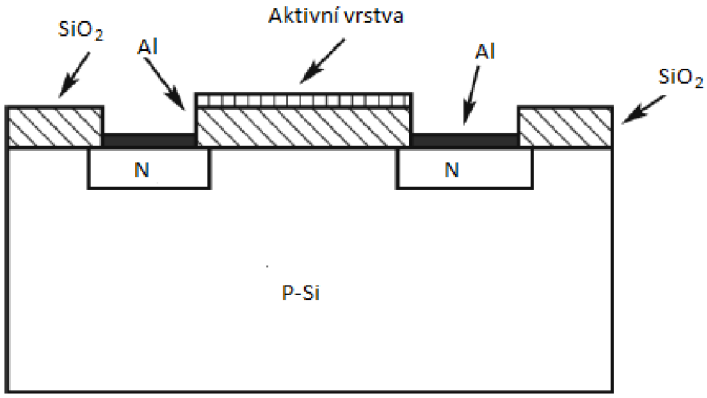
Tyto senzory využívají Schottkyho PN přechodu (Obrázek 7), kde se projevuje citlivost elektrických charakteristik na působení chemické veličiny. Vlastnosti polymeru se mění podle přítomnosti daného plynu a tím se mění voltampérová charakteristika přechodu diody.[22]



Obrázek 7: Struktura chemodiody. Převzato z [20]

4.4 Chemotranzistory

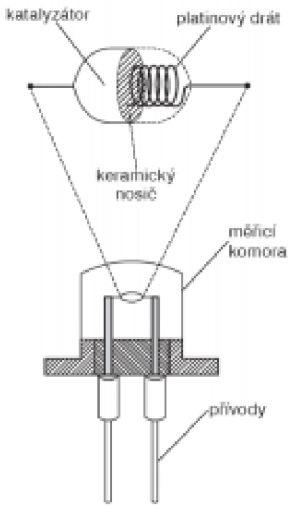
Pracují na podobném principu jako chemodiody ale místo aktivní vrstvy mají hradlo gate (Obrázek 8). Při působení plynu na senzor dochází k transformaci chemických změn na elektrický signál. Výhodou těchto senzorů je dobrá reprodukovatelnost a nižší šum výstupního signálu. Jsou ale velmi závislé na podmínkách prostředí.[19]



Obrázek 8: Struktura chemotranzistoru. Převzato z [19]

4.5 Teplotní chemické senzory

Tyto senzory využívají tepelného zabarvení, které doprovází spalovací reakci hořlavých látek. V měřící komoře analyzátoru je elektricky žhavené tělísko (pelistor) s katalyticky účinným povrchem, na kterém probíhá spalovací reakce určované látky (Obrázek 9). Teplem uvolněným při spalování se zvyšuje teplota měřicího tělíska a to se vyhodnocuje jako změna odporu. Slouží především k měření koncentrace hořlavých plynů.[23]



Obrázek 9: Struktura pelistoru. Převzato z [21]

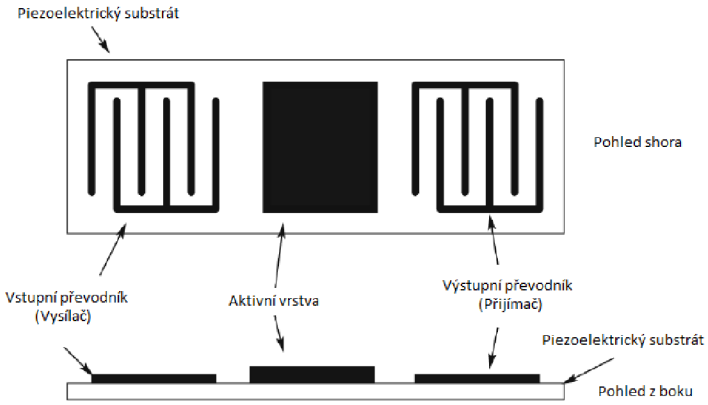
4.6 Gravimetrické (piezoelektrické) senzory

Jejich princip je založen na změně hmotnosti (tuhosti) aktivní vrstvy při chemické reakci senzoru s plynem. Chemické látky adsorpují na aktivní vrstvě, tím se mění váha vrstvy a dochází k útlumu vibrací nebo ke změně rezonance. Používají se jako

indikátory síly, tlaku, výchylky, deformace, akcelometry, snímače vibrací a hluku, reproduktory nebo mikrofony.[19]

4.6.1 Senzory SAW (Surface Acustic Wave)

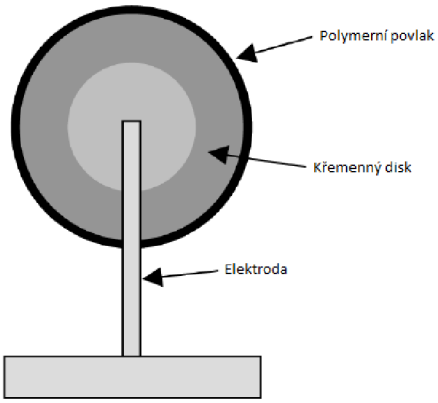
Využívají šíření akustické vlny po povrchu chemicky citlivé vrstvy a jsou schopné detekovat i velmi malé koncentrace plynů. Senzor se skládá ze dvou rezonátorů tvořenými elektrodami (Obrázek 10). Chemicky aktivní vrstva, po níž se akustická vlna šíří, tyto rezonátory spojuje. Jeden rezonátor funguje jako zdroj ultrazvukové vlny a druhý jako přijímač. Hmotnost aktivní vrstvy se změní při kontaktu se zjišťovaným plynem a tím se změní frekvence vlny. Problémem bývá špatný odstup signálu a šumu, protože SAW přístroje pracují na vysokých frekvencích (až několik jednotek GHz). Také obvody pro práci s těmito senzory jsou hodně komplexní a drahé.[19]



Obrázek 10: Struktura SAW senzoru. Převzato z [19]

4.6.2 Senzory QCM (Quartz Crystal Microbalance)

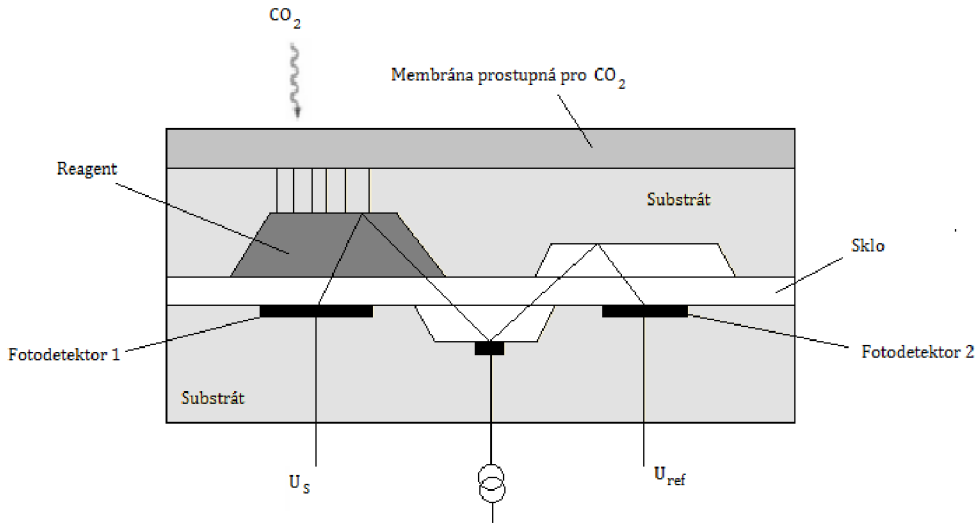
Při připojení střídavého napětí začne materiál oscilovat na svojí rezonanční frekvenci. Vzniklá vlna cestuje celým krystalem. Membrána na povrchu krystalu absorbuje plyn a zvýší tím svoji hmotnost (Obrázek 11). Zvýšením hmotnosti dojde ke změně rezonanční frekvence krystalu. Vyznačuje se vysokou citlivostí a lze ho používat při teplotách do 50°C.[19]



Obrázek 11: Struktura QCM senzoru. Převzato z [19]

4.7 Optické chemické senzory

Princip činnosti je založen na změně vlastností záření, jenž prochází látkou, která je schopná reagovat s analyzovanou látkou (Obrázek 12). Průchodem světelného záření zkoumaným plynem dochází k modulaci a měří se výsledný útlum nebo polarizace. Výhodou je rychlá doba odezvy a mohou být používány v prostorách s vysokou radiací. Nevýhodou je vysoká cena a malá životnost. Tyto senzory jsou vhodné do hořlavých a explozivních prostředí.[19]

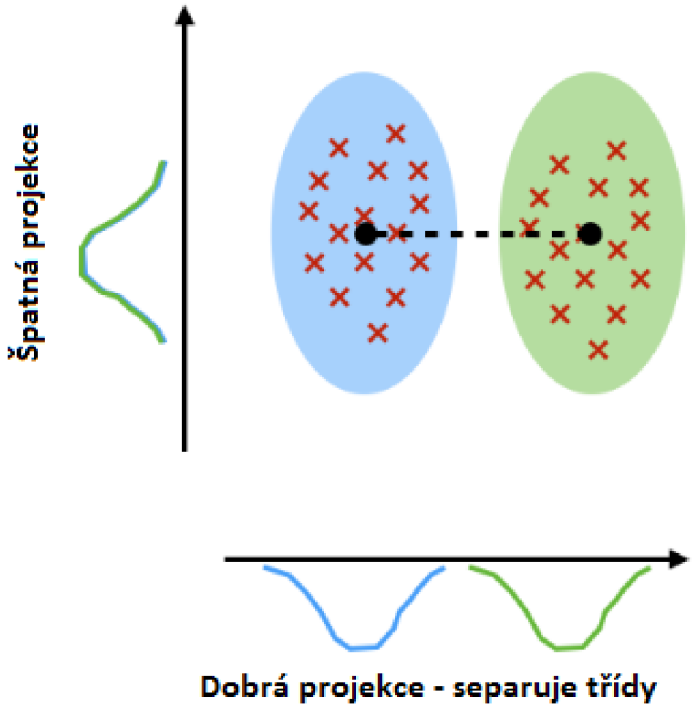


Obrázek 12: Struktura optického chemického senzoru. Převzato z [20]

5 METODY ZPRACOVÁNÍ DAT ZE SENZORŮ

5.1 Lineární diskriminační analýza

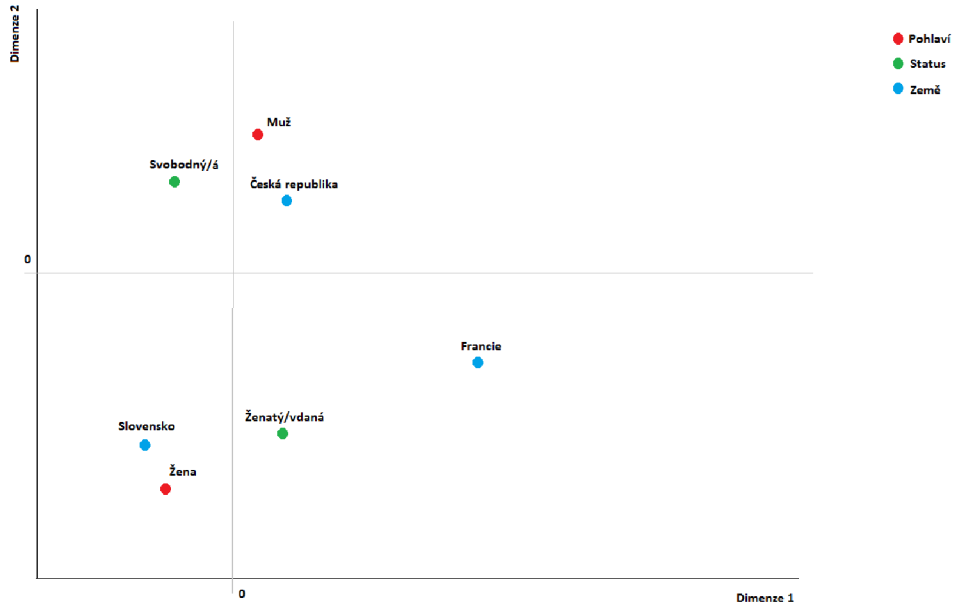
Lineární diskriminační analýza (LDA) se používá pro extrahování vlastností souboru a redukci dimenzí. Klasická LDA promítá data na nízko-dimenzionální vektorový prostor tak, aby třídy dat byly od sebe co nejdále. Problém nastává, když jsou všechny rozptylové matice singulární (jedinečné). Toto se řeší použitím částečné analýzy hlavních komponent (PCA) ještě před LDA, což zabírá hodně času a místa v paměti.[24]



Obrázek 13: Příklad výstupu z lineární diskriminační analýzy (LDA). Převzato z [25]

5.2 Korespondenční analýza

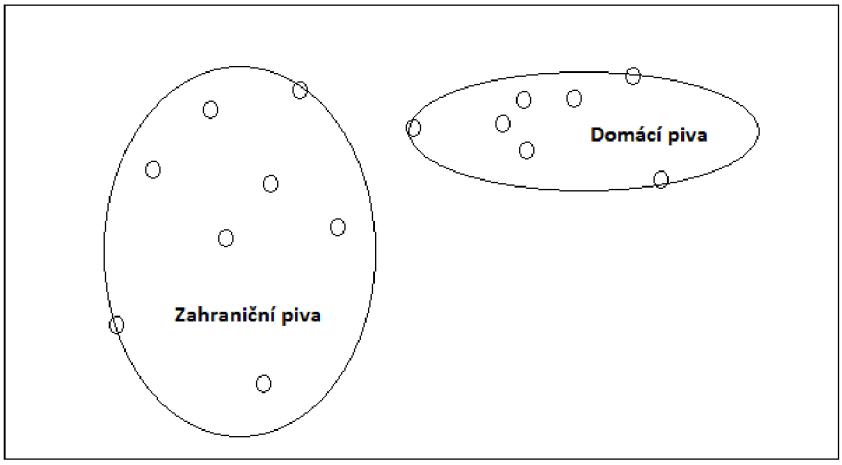
Korespondenční analýza (CA) sleduje vztahy mezi jednotlivými kategoriemi dvou kategoriálních proměnných. Výsledkem je korespondenční mapa (Obrázek 14), která představuje osy redukovaného souřadného systému, ve kterém jsou graficky zobrazeny jednotlivé kategorie obou proměnných.[26]



Obrázek 14: Příklad výstupu z korespondenční analýzy (CA). Na základě [27]

5.3 Shluková analýza

Principem shlukové analýzy (HCA) je roztřídění objektů (nebo proměnných) do několika homogenních skupin tak, aby si objekty ze stejné skupiny byly co nejpodobnější a od objektů z ostatních skupin se co nejvíce lišily (Obrázek 15).[28]

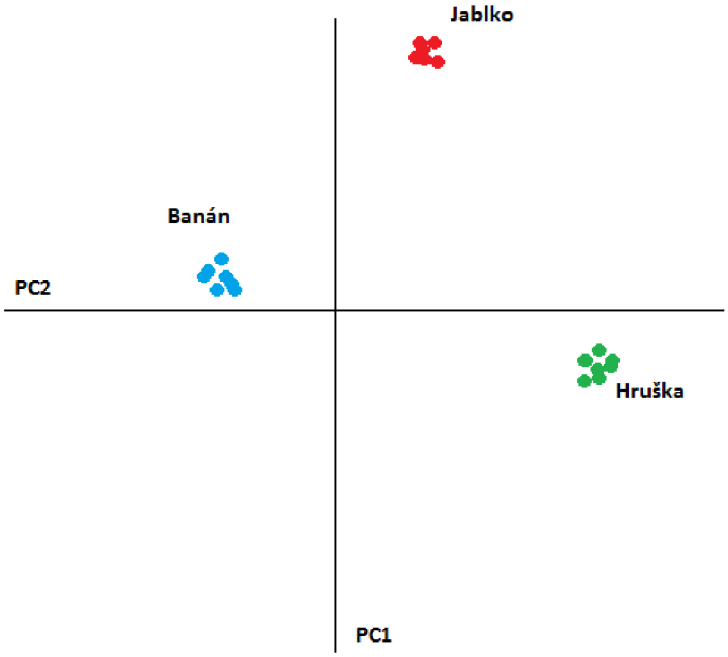


Obrázek 15: Příklad výstupu ze shlukové analýzy (HCA). Na základě [29]

5.4 Analýza hlavních komponent

Analýza hlavních komponent (PCA) možňuje snížení dimenze dat a současně volí nekorelované proměnné (hlavní komponenty), které vysvětlují většinu odchylek

v datové sadě (Obrázek 16). Tato analýza může být použita pro detekci odlehlých hodnot a pro zvýraznění důležitých vlastností.[30]



Obrázek 16: Příklad výstupu z analýzy hlavních komponent (PCA). Na základě [31]

Používá se například v kriminalistice, kde slouží k rozpoznání obličejů (Obrázek 17). Rozpoznání je založeno na identifikaci nejdůležitějších informací v obraze a porovnáním s tréninkovým obličejem. Dalším použitím je komprese barevných obrazů, kdy slouží ke zmenšení velikosti souboru.[32]

Obrázek 17: Rozpoznání obličeje pomocí metody eigenface. Převzato z [33]

6 REDUKCE DIMENZÍ POMOCÍ PCA

Zpracování naměřených dat z elektronického nosu se provede vykreslením do grafu za pomoci PCA, protože senzorů bude více jak tři a není možno všechny data zobrazit v grafu. Pokud by se jednalo o tří senzorové zařízení, bylo by to možné při použití 3D grafu. Pro více dimenzí ale už grafy nelze zobrazit. K redukci dimenzí dochází určením hlavních komponent, které obsahují nejvíce informací o vzorku, a ignorováním komponent, které nenesou mnoho informací. Ke ztrátě důležitých informací nedojde a nepotřebné informace ztratíme.[34]

6.1 Odečtení průměru

Pro snížení rizika číselných chyb v PCA se nejdříve od každé dimenze dat odečte její střední hodnota. To znamená, že od všech *x* hodnot se odečte jejich střední hodnota $\overline{x}$ a od všech *y* hodnot se odečte jejich střední hodnota $\overline{y}$. Tím se získá soubor dat s průměrnou hodnotou 0.[35]

6.2 Standardizace směrodatnou odchylkou

Aby se získali údaje bez jednotek a s rozptylem 1 na každé ose, musí se každá hodnota standardizovat. To se dělá tak, že se vypočte směrodatná odchylka σ pro jednotlivé dimenze dat jako odmocnina z rozptylu hodnot dané dimenze. Poté se pro každou hodnotu provede standardizace pomocí rovnice

$$x_{nStand} = \frac{x_n - \overline{x}}{\sigma_x} \tag{1}$$

kde x_n je *n* hodnota dimenze *x*, $\overline{x}$ je průměrná hodnota dimenze *x* a σ_x je směrodatná odchylka dimenze *x*.[36]

6.3 Výpočet kovarianční matice

Kovarianční matice popisuje přesnost výsledků vyrovnání a jejich vzájemnou závislost. Kovariance je vždy počítána mezi dvěma dimenzemi. Pro kovarianční matici souboru dat s *n* dimenzemi platí

$$C^{n\times n} = (c_{xy}, c_{xy} = cov(Dim_x, Dim_y)) \tag{2}$$

kde $C^{n\times n}$ je matice s *n* řádky a *n* sloupci, Dim_x je *x* dimenze a Dim_y je *y* dimenze.[35]

6.4 Výpočet vlastních vektorů a vlastních hodnot kovarianční matice

Vlastní vektor je takový vektor, jehož směr se po aplikaci transformace nezmění, změní

se pouze jeho velikost. Vlastní hodnota je koeficientem změny velikosti vlastního vektoru. Rovnice pro vlastní vektor

$$Av = \lambda v \tag{3}$$

kde A je čtvercová matice a v je vlastní vektor matice příslušný vlastnímu číslu λ.[37]

6.5 Výběr hlavních komponent a formování funkčního vektoru

Hlavní komponenty se vybírají podle velikosti vlastní hodnoty. Nejdůležitější hlavní komponenta bude mít nejvyšší vlastní hodnotu, druhá hlavní komponenta bude mít druhou nejvyšší hodnotu a tak dál. Poté se seřadí vlastní vektory podle jejich vlastní hodnoty od největší po nejmenší, čímž se seřadí podle jejich významnosti. Nyní se méně významné hlavní komponenty mohou zanedbat a zvolí se počet hlavních komponent podle toho, kolik bude potřeba ke grafickému zobrazení. Pro dvou dimenzionální graf jsou třeba dvě hlavní komponenty a pro tří dimenzionální graf jsou potřeba tři hlavní komponenty. Zanedbáním se přijde o nějaké informace, ale jelikož je jejich důležitost malá, neztratí se mnoho a grafy se stále dají považovat za přesné. Nyní se zformuje funkční vektor (matice vektorů) tím, že se vezmou vlastní vektory a zformuje se s nimi matice, kde každý sloupec obsahuje hodnoty pro jeden hlavní vektor.[35]

6.6 Odvození nového souboru dat

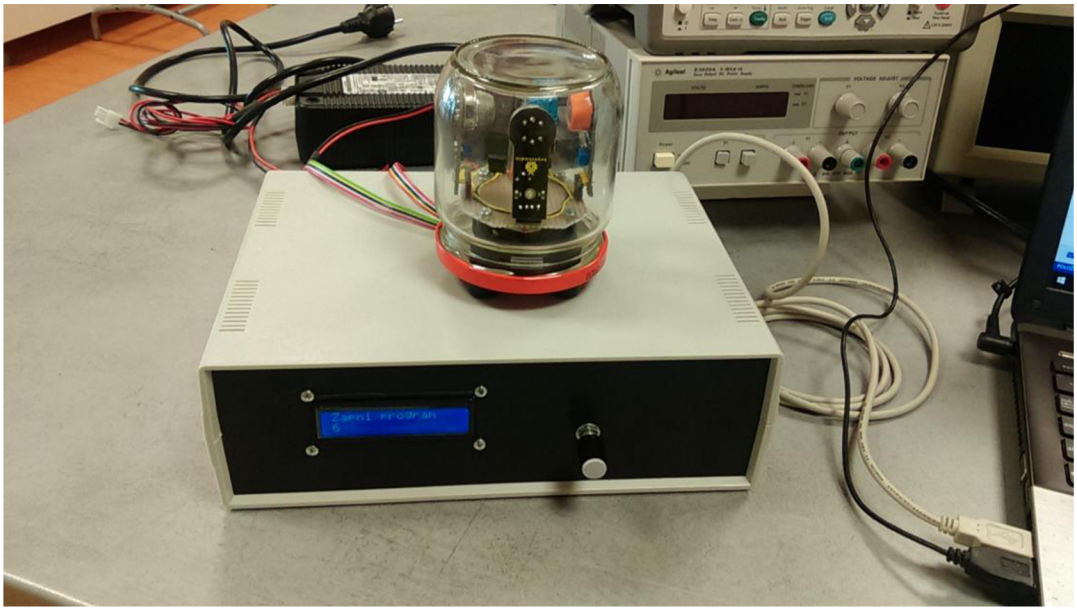
Posledním krokem je vynásobení matice původních dat po standardizaci funkčním vektorem. Toto se provede tak, že nejprve se transponuje matici funkčního vektoru a poté také matice původních dat po standardizaci. Nakonec se mezi sebou vynásobí a dostane se matice, kde v prvním řádku bude první hlavní komponenta a v druhém druhá hlavní komponenta. Pro grafické zobrazení dat se použije první hlavní komponentu jako osa x a druhá hlavní komponentu jako osa y.[35]

7 ELEKTRONICKÝ NOS POUŽITÝ PRO ZÍSKÁNÍ DAT

Data pro zpracování vytvořeným programem se získali pomocí experimentálního elektronického nosu (Obrázek 18), jehož původní konstrukci navrhl Beneš ve svojí bakalářské práci.[38] Toto zařízení bylo dále modifikováno a v současnosti obsahuje celkem 5 vodivostních senzorů. První senzor je MQ-8, který je určen pro detekci vodíku. Druhý senzor je MQ-ST 135, který je nejcitlivější na amoniak. Třetí senzor je MQ-3, který je velmi citlivý na alkohol. Senzory jsou modulární a snadno vyměnitelné za další typy. Dále je k analyzátoru připojen modul SPG30 se dvěma senzorickými elementy, ze kterého lze získat další tři signály (vodík, těkavé organické látky a CO_2). Nos byl dále doplněn oproti původní konstrukci o senzor teploty a vlhkosti ASAIR AM 2302 (DHT22).

Zařízení je ovládáno mikrokontrolérem ATmega2560 na vývojové desce Arduino Mega 2560, ke kterému je připojen display a rotační enkodér s tlačítkem pro ovládání měření. Senzory jsou připojeny jako vstupní modul pro Arduino. Ze senzorů se hodnoty odesílají po pěti sekundách po sériové lince do počítače, kde je program zpracuje podle nastavení uživatele.

Před samotným měřením je nutno elektronický nos připojit USB kabelem k počítači, aby bylo možno s naměřenými daty později pracovat. Ihned po zapnutí zařízení se provede automatická kontrola, aby se zjistily případné problémy se zařízením, jako například nepřipojený senzor. Poté se měřicí komora vyčistí od možných pachových stop pomocí ventilátoru. Po této fázi se do měřicí komory vloží vzorek a senzory se začnou žhavit. Až po určité době dojde ke spuštění měření a data se odesílají po sériové lince do počítače. Po doměření nastává vyčistění vzduchu od zbylých pachů po vzorku. Dále lze vložit nový vzorek a měřit dál.



Obrázek 18: Konstrukce experimentálního prototypu elektronického nosu

8 GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT

Po přijetí dat je nutné je dále zpracovat, aby bylo možno z nich něco vyčíst. Pro ukázku zpracování naměřených dat pomocí PCA byly naměřeny 3 vzorky vín. První dva vzorky jsou různé druhy bílých vín a třetí vzorek je červené víno.

Nejprve se data ze senzoru uložily do CSV souboru, aby bylo možné s nimi pracovat. Protože bylo naměřeno velké množství dat pro každý vzorek, je nutné tyto hodnoty zprůměrovat pro každý vzorek. Aby nedošlo k tomu, že by naměřené hodnoty jednoho vzorku měly náhlý výkyv hodnot pro jeden senzor, po deseti naměřených hodnotách se vypočte jejich průměr.

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vzorků vín

	Vzorek1			Vzorek2			Vzorek3		
	senzor1	senzor2	senzor3	senzor1	senzor2	senzor3	senzor1	senzor2	senzor3
1	396	760	988	367	711	986	333	700	985
2	396	761	988	367	712	986	333	701	985
3	396	761	988	367	710	986	333	701	985
4	396	760	988	367	708	986	333	700	985
5	396	760	988	367	708	986	333	701	985
6	397	760	988	366	708	986	333	703	985
7	397	760	988	366	708	986	333	704	985
8	397	759	988	366	709	986	332	706	985
9	397	759	988	365	709	986	332	708	985
10	397	759	988	365	707	986	332	711	985
průměr p1	396,5	759,9	988	366,3	709	986	332,7	703,5	985
11	397	759	988	365	707	986	332	713	985
12	397	759	988	365	706	986	332	716	985
13	397	759	988	364	707	986	332	717	985
14	397	759	988	364	707	986	332	718	985
15	397	759	988	364	706	986	332	719	985
16	397	759	988	364	707	986	332	720	985
17	397	758	988	364	707	986	332	721	985
18	397	758	988	364	709	986	332	722	985
19	395	758	988	364	710	986	332	723	985
20	397	759	988	364	710	986	332	725	985
průměr p2	396,8	758,7	988	364,2	707,6	986	332	719,4	985
21	398	759	988	364	708	986	332	727	985
22	398	759	988	364	703	986	331	729	985
23	398	759	988	364	699	986	332	730	985
24	399	759	988	364	697	987	332	731	985
25	399	759	988	364	697	986	332	732	985
26	400	759	988	364	697	986	331	734	985
27	400	759	988	364	698	986	332	736	985
28	400	759	988	364	698	986	332	737	985
29	401	759	988	364	699	986	332	739	985
30	401	759	988	364	701	986	332	739	985
průměr p3	399,4	759	988	364	699,7	986,1	331,8	733,4	985

Z třiceti naměřených hodnot pro každý senzor u vzorku jsou získány tři hodnoty (Tabulka 2), které budou vynášeny do grafu.

Tabulka 2: Průměry naměřených hodnot

	senzor1	senzor2	senzor3
V1.p1	396,5	759,9	988
V1.p2	396,8	758,7	988
V1.p3	399,4	759	988
V2.p1	366,3	709	986
V2.p2	364,2	707,6	986
V2.p3	364	699,7	986,1
V3.p1	332,7	703,5	985
V3.p2	332	719,4	985
V3.p3	331,8	733,4	985

Pro každý senzor se zjistí jeho střední hodnota. Pro senzor1 je to 364,2, pro senzor2 je hodnota 719,4 a pro senzor3 hodnota 986. Nyní se jejich střední hodnoty odečtou od každé původní hodnoty. Tím se získá soubor dat s průměrem 0 (Tabulka 3).

Následuje standardizace směrodatnou odchylkou, takže se musí vypočítat směrodatná odchylka pro každý senzor (Tabulka 4). Pro senzor1 má hodnotu 26,718, pro senzor2 24,042 a pro senzor3 1,245.

Tabulka 3: Vycentrované hodnoty

	senzor1	senzor2	senzor3
V1.p1	32,3	40,5	2
V1.p2	32,6	39,3	2
V1.p3	35,2	39,6	2
V2.p1	2,1	-10,4	0
V2.p2	0	-11,8	0
V2.p3	-0,2	-19,7	0,1
V3.p1	-31,5	-15,9	-1
V3.p2	-32,2	0	-1
V3.p3	-32,4	14	-1

Tabulka 4: Hodnoty po standardizac

	senzor1	senzor2	senzor3
V1.p1	1,2089	1,6846	1,6069
V1.p2	1,2202	1,6346	1,6069
V1.p3	1,3175	1,6471	1,6069
V2.p1	0,0786	-0,4326	0,0000
V2.p2	0,0000	-0,4908	0,0000
V2.p3	-0,0075	-0,8194	0,0803
V3.p1	-1,1790	-0,6613	-0,8034
V3.p2	-1,2052	0,0000	-0,8034
V3.p3	-1,2127	0,5823	-0,8034

Pro standardizované hodnoty se vytvoří kovarianční matice (Tabulka 5).

Tabulka 5: Kovarianční matice standardizovaných hodnot

	senzor1	senzor2	senzor3
senzor1	1	0,685514	0,983166
senzor2	0,685514	1	0,789749
senzor3	0,983166	0,789749	1

Vypočítají se vlastní hodnoty a vlastní vektory (Tabulka 6).

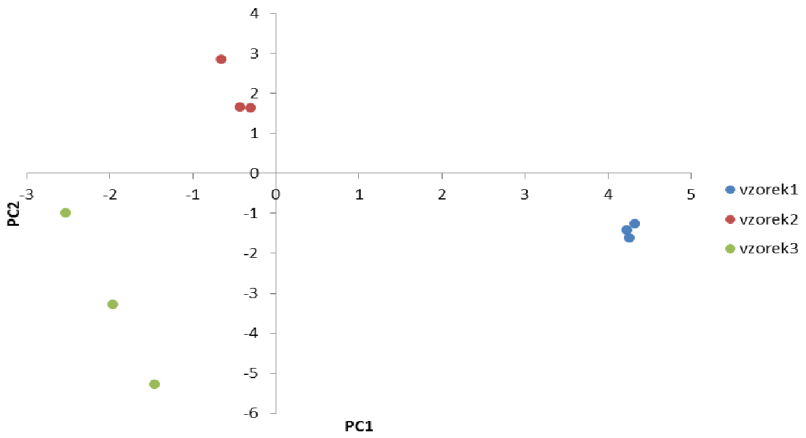
Tabulka 6: Vlastní hodnoty a vlastní vektory

	pc1	pc2	pc3
vlastní hodnota	2,64537	0,349995	0,004636
vlastní vektor	0,965022	2,05977	-0,83949
	0,882042	-3,38728	-0,21526
	1	1	1

Po seřazení podle největší vlastní hodnoty lze vidět, že třetí hlavní komponenta má zanedbatelný vliv na naměřené hodnoty a může být zanedbána. Získají se dvě hlavní komponenty a může se sestrojit dvourozměrný graf (Obrázek 19). Nejprve se musí vynásobit transponovaná matice původních standardizovaných hodnot transponovanou maticí vlastních vektorů (Tabulka 7).

Tabulka 7: Hodnoty pro konečné grafické zpracování

	V1.p1	V1.p2	V1.p3	V2.p1	V2.p2	V2.p3	V3.p1	V3.p2	V3.p3
pc1	4,2594	4,2262	4,3311	-0,3057	-0,4329	-0,6466	-2,5245	-1,9664	-1,4601
pc2	-1,6093	-1,4166	-1,2585	1,6272	1,6625	2,8435	-0,9919	-3,2858	-5,2737
pc3	0,2294	0,2307	0,1463	0,0271	0,1056	0,2661	0,2661	0,2084	0,0893



Obrázek 19: Grafický výstup z PCA

Z grafu (Obrázek 19) je vidět, že různé druhy vín se akumulují na jiných místech. Bílé vína se v průběhu měření ustálila a shlukovala se na jednom místě (vzorek1 a vzorek2). Hodnoty červeného vína se neustálily, a proto lze vidět tečky relativně daleko od sebe (vzorek3). Tomuto by se pravděpodobně dalo zabránit, pokud by se vybraly hodnoty, které byly naměřeny po delším měření a ne hned na začátku měření. Pro rozlišení těchto vzorků byly zvoleny vhodné hlavní komponenty, protože jde rozlišit, kde se jaké vzorky nacházejí. Senzor3 (senzor MQ-8) byl ve vyhodnocování zanedbán a lze předpokládat, že dusík nehraje v rozpoznávání vín velkou roli.

9 NÁVRH A REALIZACE PROJEKTU PRO ZPRACOVÁNÍ DAT

9.1 Vývojové prostředí

Program byl vytvořen ve vývojovém prostředí Visual Studio verze 2019 16.5 v jazyce C# a uživatelské prostředí v jeho grafickém subsystému WPF (Windows Presentation Foundation), který umožňuje vytváření grafického prostředí a volání metod pomocí událostí, jako je třeba zmáčknutí tlačítka.

Jedná se o vývojové prostředí od společnosti Microsoft, které umožňuje vývoj jak počítačových aplikací, tak i například vývoj aplikací pro mobil. Vestavěnými jazyky jsou C/C++, VB.NET a C#. Přidáním jazykových služeb však podporuje i jazyky jako je Python, Ruby, F#, HTML, JavaScript nebo CSS.[39]

Jednou z výhod Visual Studia je i možnost přijímání dat ze sériové linky pomocí třídy SerialPort. Není tedy nutné použít další program pro zapisování naměřených dat do CSV souboru.

Visual Studio také podporuje implementaci knihoven z vnějších zdrojů. Díky tomu mohou uživatelé používat knihoven, které někdo před nimi napsal a nemusí řešit mnohé zdlouhavé problémy především s výpočty.

9.2 Jazyk C#

Jazyk C# (Obrázek 20) je objektově orientovaný programovací jazyk vyvinutý firmou Microsoft. Tento jazyk je založen na jazycích C++ a Java a syntaxi čerpá z jazyka C. Používá se například k vytváření databázových programů, webových aplikací a stránek, formulářových aplikací nebo softwaru pro mobilní zařízení.[40]

Základním prvkem při tvorbě aplikace je třída. Třída definuje typ objektu a je složena z atributů a metod. Atributy jsou vlastnosti objektu, jako jsou například proměnné, ukazatele nebo struktury. Metoda obsahuje příkazy, které se po vyvolání metody provedou. Pro jednotlivé prvky třídy (atributy a metody) se může použít modifikátorů přístupu. Pokud u některého člena není uveden modifikátor, je mu přiřazena hodnota *private*, což znamená, že člen je přístupný pouze členům stejné třídy. Dalšími modifikátory může být *public*, kdy označený člen je dostupný všem bez omezení, *protected*, kdy k takto označenému členu lze přistupovat uvnitř vlastní třídy a ve třídách, pro které je jeho třída základem, a *internal*, kdy je člen přístupný všem v rámci stejného sestavení (*assembly*).[41]

```
Form1.cs*   Form1.cs [Design]*
datapot                                   datapot.Form1
1   using System;
2   using System.Collections.Generic;
3   using System.ComponentModel;
4   using System.Data;
5   using System.Drawing;
6   using System.Linq;
7   using System.Text;
8   using System.Threading.Tasks;
9   using System.Windows.Forms;
10
11  namespace datapot
12  {
        3 references
13      public partial class Form1 : Form
14      {
15          string dataIN;
16
            1 reference
17          public Form1()
18          {
19              InitializeComponent();
20
21              serialPort1.Open();
22
23          }
24
            1 reference
25          private void serialPort1_DataReceived(object sender, System.IO.Ports.SerialDataReceivedEventArgs e)
26          {
27
28              dataIN = serialPort1.ReadLine();
29              this.Invoke(new EventHandler(ShowData));
30
31          }
32
            1 reference
33          private void ShowData(object sender, EventArgs e)
34          {
35              text_box_dataIN.Text += dataIN + "\r\n";
36          }
37
38
39      }
40  }
41
```

Obrázek 20: Ukázka kódu v jazyce C# v prostředí Visual Studio

9.3 Accord.NET

Accord.NET je framework (aplikační rámec) pro vědecké práce v .NET. Tento framework obsahuje knihovny zaměřené na lineární algebru, numerickou optimalizaci, statistiku, strojové učení, umělé neuronové sítě a zpracovávání signálů a obrazů. Pro výpočet PCA analýzy byla použita knihovna Statistics, ve které je funkce pro její výpočet. Podstatnou roli při vybrání této knihovny také hrála skutečnost, že se jedná o svobodnou licenci.[42]

9.4 Návrh projektu

Projekt se skládá ze dvou oddělených programů. Programy byly vytvořeny odděleně, aby se nestalo, že uživatel místo určení neznámého vzorku tento vzorek přidá do databáze a tím znehodnotí další měření.

První program slouží pro vytvoření databáze vzorků, kdy uživatel pomocí prototypu elektronického nosu naměří určitá data a uloží je pod názvem vzorku do databáze.

Druhý program slouží k určení neznámého vzorku. Uživatel pomocí prototypu elektronického nosu naměří hodnoty a program porovnáním s databází vyhodnotí, o jaký vzorek se jedná. Po vyhodnocení má uživatel možnost podívat se na graf, který slouží k dodatečnému vyhodnocení, pokud program určí, že vzorek může být více jak jedna věc.

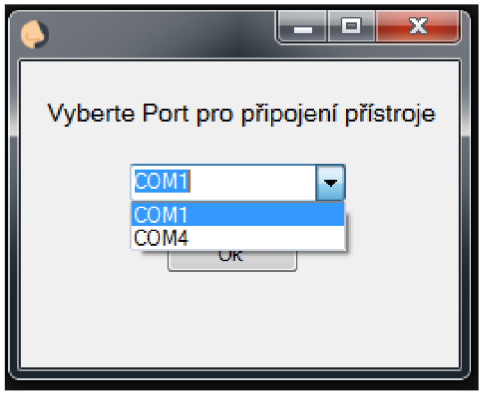
9.5 Uživatelské rozhraní

Programy pro vytvoření databáze i určení vzorků jsou graficky navrženy tak, aby byli co nejsrozumitelnější a nejjednodušší na používání, aby i méně zkušený uživatel byl schopný tyto programy používat. Z tohoto důvodu je také použita vlastnost tlačítka *disable,* díky které uživatel nemůže tlačítko zmáčknout, pokud nebude splněna určitá podmínka. Tento způsob je využit k navádění uživatele a zároveň zajištění správné funkce programu.

9.6 Vytvoření databáze vzorků

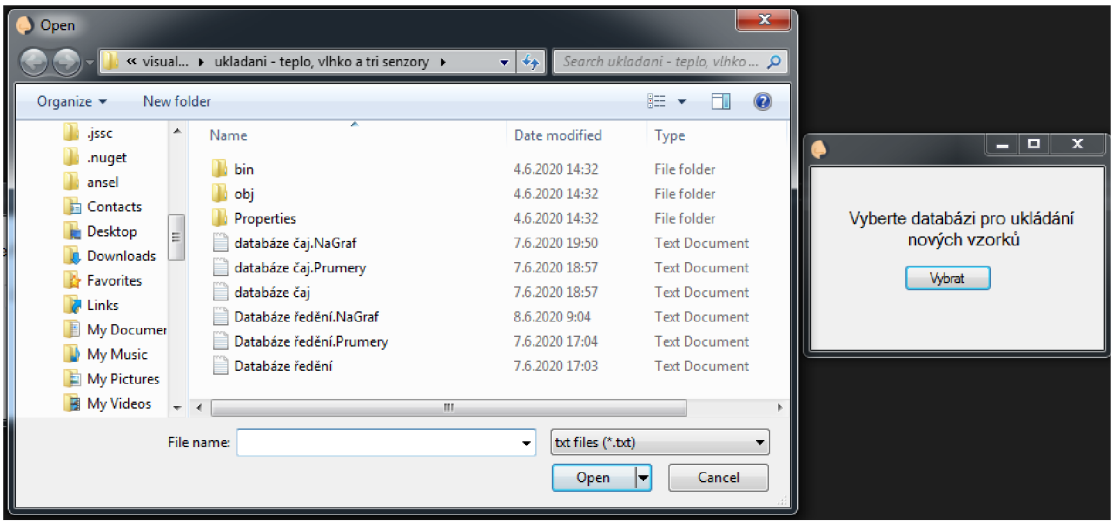
Program pro vytvoření databáze se skládá z pěti dialogových oken.

Při spuštění souboru se objeví okno (Obrázek 21), kde uživatel zvolí port, v kterém je přístroj zapojen. Názvy portů jsou přidány do *comboBoxu* událostí, kdy uživatel rozklikne nabídku. Pokud si uživatel žádný port nezvolí, vyskočí prvek *messageBox* a upozorní uživatele, že musí zvolit port. Po odsouhlasení výběru tlačítkem *OK* se zobrazí nové dialogové okno.



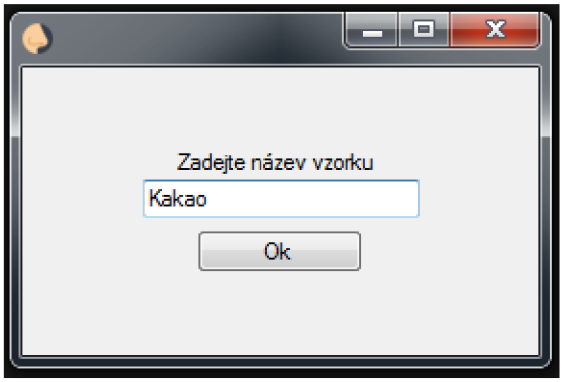
Obrázek 21: Dialogové okno pro zvolení portu

Druhé dialogové okno (Obrázek 22) navede uživatele k výběru textového souboru databáze. Kliknutím na tlačítko *Vybrat* se otevře dialogové okno *fileDialog*, které slouží k vybrání souboru z počítače. Pokud uživatel okno zavře a tedy žádný soubor nevybere, vrátí se na druhé dialogové okno. Pokud soubor zvolí, otevře se třetí dialogové okno.



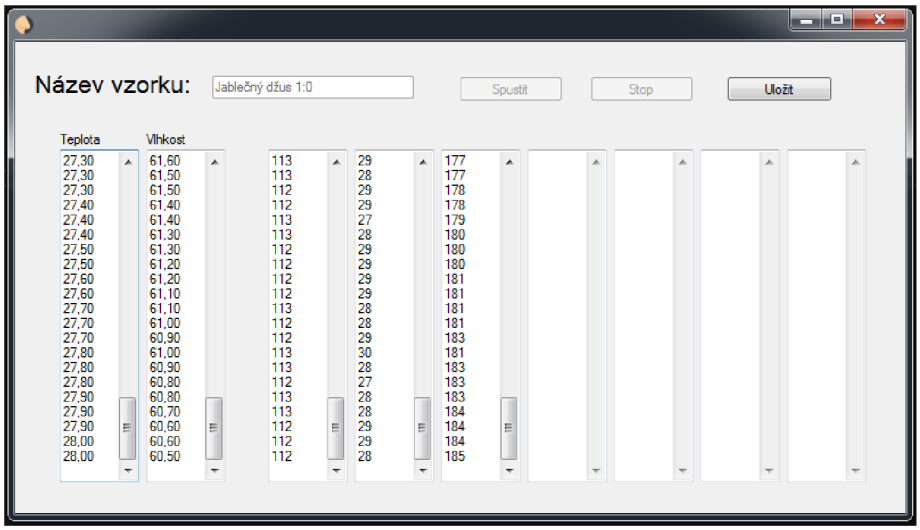
Obrázek 22:Dialogové okno pro vybrání databáze

Třetí dialogové okno (Obrázek 23) chce po uživateli, aby do *textBoxu* napsal název vzorku, který chce přidat do databáze (který bude měřit). Pokud nezadá název a klikne na tlačítko *OK*, vyskočí *messageBox* a upozorní uživatele, že musí napsat název vzorku. Pokud název napíše a klikne na tlačítko *OK,* otevře se čtvrté dialogové okno.



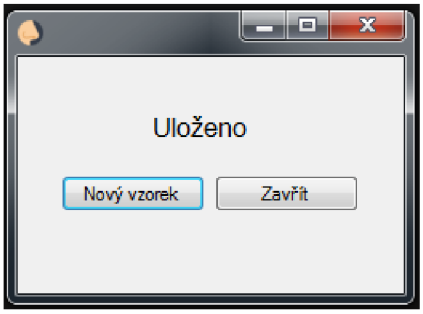
Obrázek 23: Dialogové okno pro pojmenování nového vzorku

Čtvrté dialogové okno (Obrázek 24) slouží pro zobrazení měřených hodnot přístrojem. Uživatel zahájí měření kliknutím na tlačítko Spustit a v okamžiku, kdy program přijme data, se tato data zobrazí a s názvem vzorku se uloží do databáze vzorků. Zároveň začnou plnit fronty typu *FIFO*. Každá měřená proměnná má svoji vlastní frontu, které obsahuje 30 hodnot. Po naplnění front je uživateli umožněno zastavit měření tlačítkem *Stop*. Při této události se také z hodnot ve frontách vypočtou tři průměry pro každou proměnnou. Kliknutím na tlačítko *Uložit* se průměry uloží i s názvem vzorku do vlastního textového souboru a zobrazí se poslední dialogové okno.



Obrázek 24: Dialogové okno s naměřenými hodnotami

Páté dialogové okno (Obrázek 25) dává uživateli na výběr, jestli chce měřit nový vzorek nebo program zavřít. Pokud klikne na tlačítko *Nový vzorek*, čtvrté a páté dialogové okno se zavře a uživatel vidí prázdné třetí okno, které po něm chce název nového vzorku. Pokud ale uživatel klikne na tlačítko *Zavřít*, celý program se vypne.



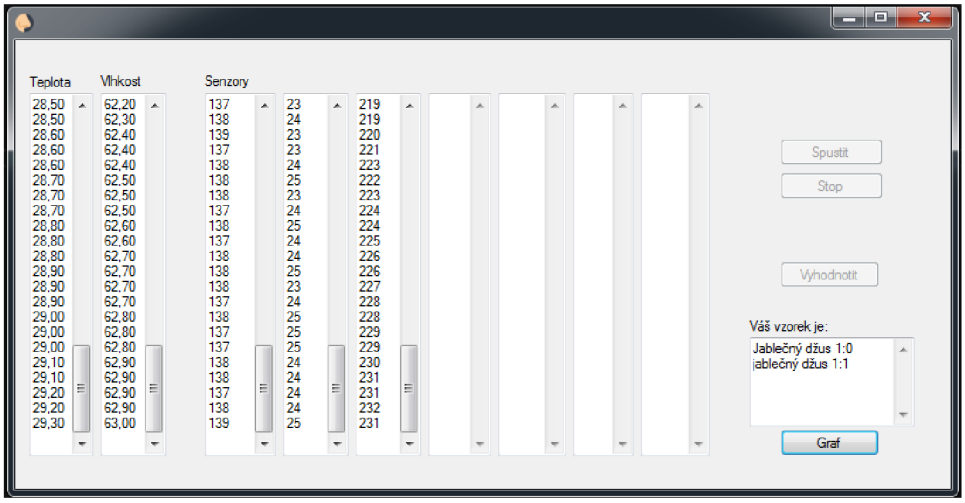
Obrázek 25: Dialogové okno pro další postup

9.7 Určení vzorku

Program pro určení měřeného vzorku se skládá ze čtyř dialogových oken. První dvě okna fungují stejně jako u programu pro vytvoření databáze.

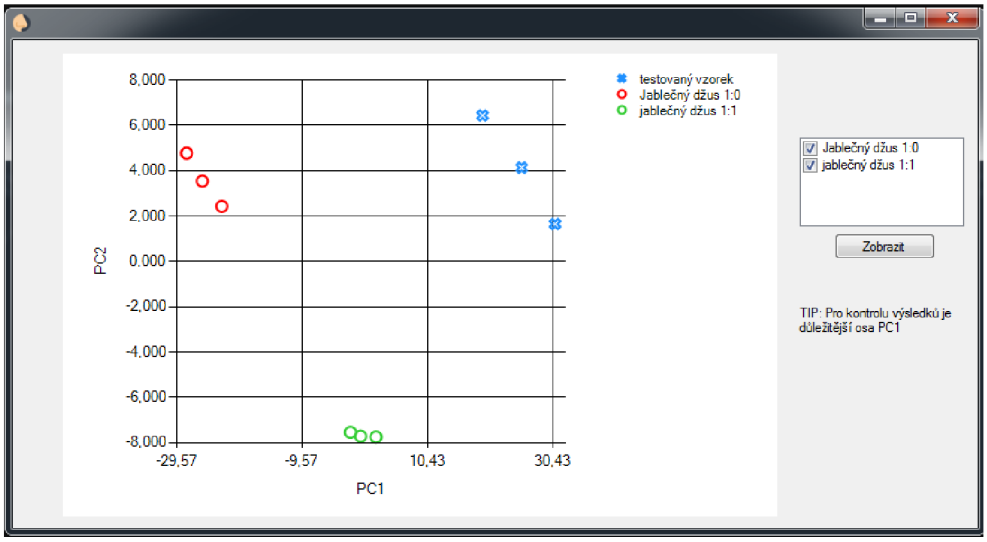
Třetí dialogové okno (Obrázek 26) slouží k zobrazení naměřených hodnot a pracuje na stejném principu jako čtvrté dialogové okno u programu pro vytvoření databáze. Odlišnosti jsou až u stisknutí tlačítka *Stop*, kdy se po vypočtení průměrů jednotlivých proměnných odblokuje tlačítko *Vyhodnotit*. Po stisknutí tohoto tlačítka dojde k vymazání pomocného textového souboru a zapsání průměrných hodnot naměřeného vzorku. Poté program projde soubor s databází průměrů, a pokud najde vzorek se stejnými hodnotami (počítá se i s možnou odchylkou), přidá se název vzorku do *Listu*, což je seznam objektů. Následně program projde soubor databáze průměrů, a pokud je název vzorku stejný s některým z názvů v *Listu*, zapíše se název

i průměrnými hodnotami do pomocného textového souboru. Názvy vzorků, ideálně pouze jeden, se zobrazí v *textBoxu*. *Kdyby* nastal případ, že naměřený vzorek neodpovídá žádnému ze vzorků v databázi, objeví se *messageBox*, který o této skutečnosti informuje uživatele. Po vyhodnocení se také odblokuje tlačítko *Graf*, které při stisknutí zobrazí poslední dialogové okno.



Obrázek 26: Dialogové okno s vyhodnoceným vzorkem

Čtvrté dialogové okno (Obrázek 27) slouží ke grafickému zobrazení vyhodnocených vzorků. Pomocí funkce *PrincipalComponentAnalysis* z knihovny *Accord.Statistics.Analysis* se vytvoří soubor dat pro zobrazení dvou hlavních komponent do grafu. Do *checkedListBoxu* se načtou názvy vzorků a výchozí stav je takový, že jsou všechny zatrhnuté. Zobrazený graf bude vždy obsahovat hodnoty pro testovaný vzorek a hodnoty pro zatrhnuté vzorky. Aktualizace zobrazení vybraných vzorků se děje při stisknutí tlačítka *Zobrazit*.



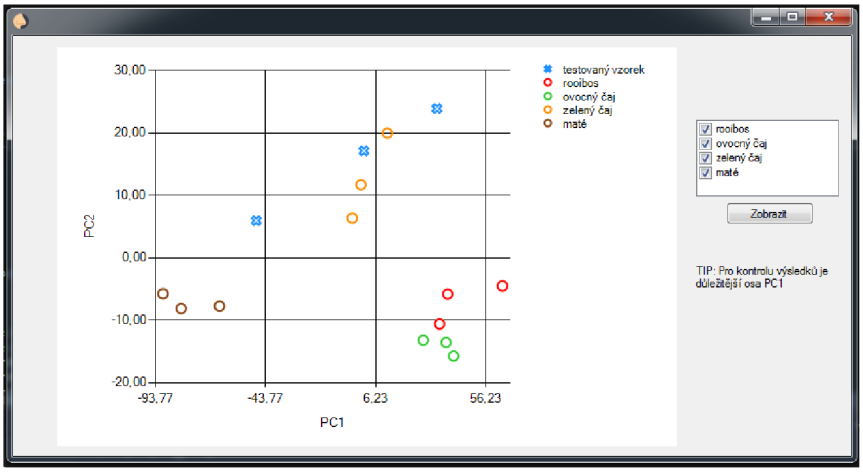
Obrázek 27: Příklad dialogového okna s grafem

10 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimentální měření mělo za úkol ověřit funkčnost programu. Pro tento účel se prototypem elektronického nosu (z důvodu technické chyby nebyl použit senzor SPG30) vytvořila databáze několika druhů čajů. Jednalo se o černý čaj, zelený čaj, bylinný čaj, rooibos, ovocný (jahodový) čaj a maté. Každý čaj bylo nutné extrahovat více jak tři hodiny, aby se dosáhlo co nejsilnější vůně. Poté se odměřené množství nalilo do kelímku pro měření a vytvořila se databáze obsahující každý druh čaje. Pro porovnání schopnosti rozeznat druhy čajů podle vůně byl proveden experiment za pomoci pěti respondentů. Jednalo se o dva muže (oba věk 26 let) a tři ženy (věk 23, 29 a 30), kteří všechny tyto čaje znají. Každý čaj byl nalit na černou mističku, čímž se zamezilo ovlivnění dobrovolníků barvou vzorků, a s minutovou prodlevou byl každý vzorek předložen dobrovolníkům ke zhodnocení. Dobrovolníci poté zaznamenali, o jaký druh čaje se podle nich jedná. Tento experiment dělal problém jak lidskému nosu, tak i elektronickému, jak je možno vidět na výsledcích (Tabulka 8). Průměrný počet správně odhadnutých vzorků lidským nosem je 3,4. Pomocí programu se správně určily 3, i když ne vždy napoprvé. Některá měření pomocí prototypu se musely opakovat, protože naměřené výsledky neodpovídaly předpokládaným výsledkům převážně z důvodu uvolnění jednoho ze senzorů nebo nedostatečnému vyvětrání jak senzorů, tak skleněné nádoby, ve které se měřilo. Vybrané čaje měli velice podobné naměřené hodnoty (Obrázek 28). Pokud by chtěl uživatel lépe určit čaje, musely by se použít jiné senzory.

Tabulka 8: Výsledky experimentu rozpoznání čajů

Čaje	muž 1	muž 2	žena 1	žena 2	žena 3	enos	správně
vzorek 1	nevím	nevím	ovocný	bylinný	nevím	černý	bylinný
vzorek 2	zelený	černý	zelený	maté	zelený	rooibos	zelený
vzorek 3	nevím	bylinný	černý	černý	černý	černý	černý
vzorek 4	rooibos	ovocný	ovocný	rooibos	nevím	rooibos	rooibos
vzorek 5	ovocný	ovocný	ovocný	ovocný	ovocný	ovocný	ovocný
vzorek 6	maté	rooibos	maté	maté	zelený	zelený	maté



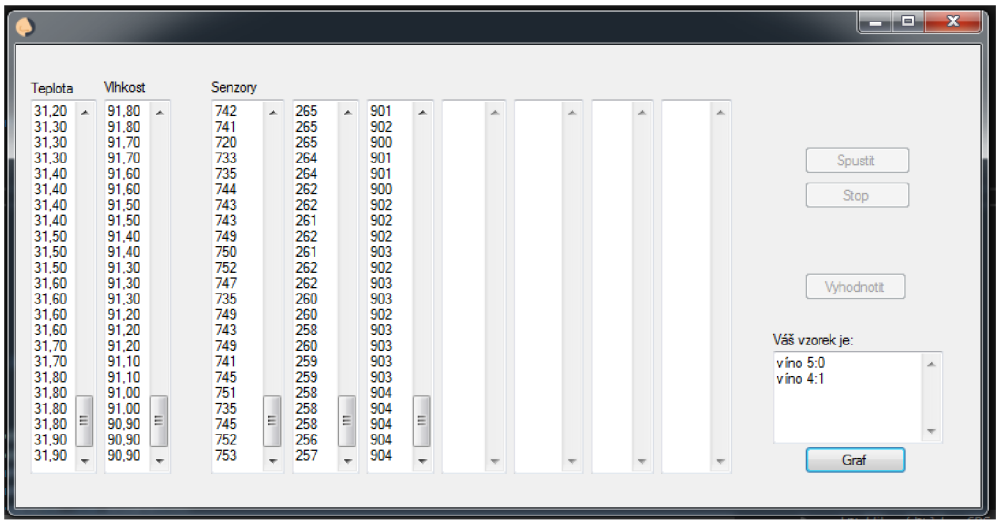
Obrázek 28: Graf při vyhodnocení měření maté

Další experiment měl za úkol zjistit, jestli jsou vzorky vína a lihoviny „Božkov tradiční“ ředěné nebo ne. Nejprve se naměřily jednotlivé databáze, kdy vzorky byly míchány v určitém poměru s vodou. Poté se náhodný vzorek změřil a programem vyhodnotil. Pro porovnání výsledků rozpoznání programem s lidským nosem byl proveden experiment s pěti lidskými dobrovolníky. Bylo nachystáno pět vzorků vína, kdy každý byl smíchán s vodou v poměru 5:0, 4:1, 3:2, 2:3 a 1:4. Aby nedošlo k ovlivnění dobrovolníků barvou vzorku, byli zvoleny černé malé mističky, na které se nalilo určité množství vzorku. Dobrovolníkům se přiložila mistička s náhodným vzorkem pod nos a po přičichnutí si každý zapsal, jestli si myslí, že vzorek je nebo není ředěn. Stejný postup se opakoval i pro lihovinu. Výsledek experimentu (Tabulka 9) ukázal, že program je schopen rozpoznat stejně jako lidský nos, zda je alkohol ředěn nebo ne. V některých případech nos špatně rozeznal poměr ředění, ale dobrovolníci nebyli schopni tento poměr vůbec určit, pouze uvedli, že se jedná o ředěný vzorek nebo neředěný. I při tomto experimentu se musela některá měření opakovat ze stejných důvodů jako v předchozím experimentu.

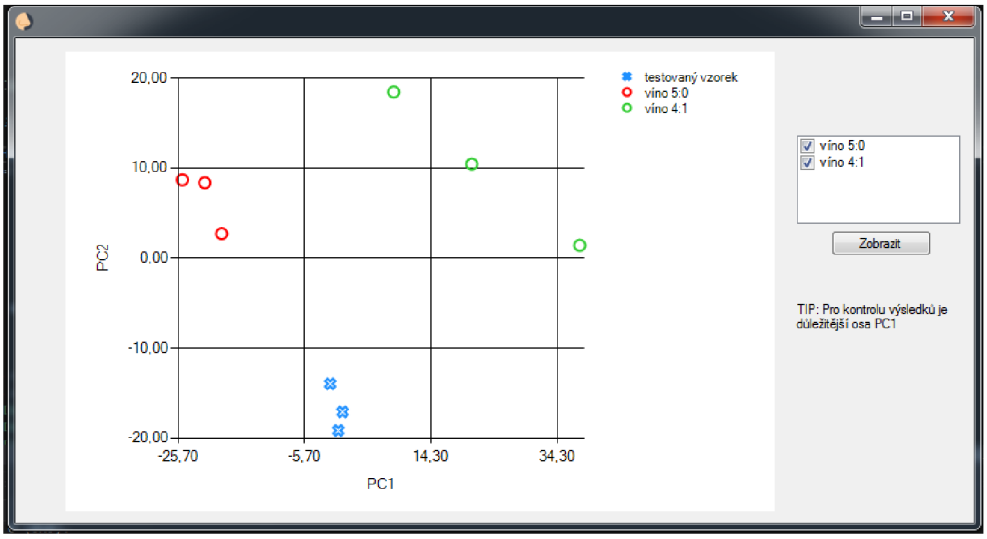
Tabulka 9: Výsledky experimentu ředění (a – ředěno, n – neředěno)

	muž 1	muž 2	žena 1	žena 2	žena 3	enos	správně
víno							
vzorek 1	a	n	a	a	a	a	a (3:2)
vzorek 2	n	a	n	n	a	n	a (4:1)
vzorek 3	a	a	a	a	a	a	a (1:4)
vzorek 4	a	a	a	a	a	a	a (2:3)
vzorek 5	n	n	n	n	n	n	n (5:0)
lihovina							
vzorek 1	n	n	n	a	n	a	a (3:2)
vzorek 2	a	a	a	a	a	a	a (2:3)
vzorek 3	a	a	a	a	a	a	a (1:4)
vzorek 4	n	n	n	n	n	n	n (5:0)
vzorek 5	a	a	n	a	n	a	a (4:1)

Obrázek 28 ukazuje příklad, kdy při měření pomocí prototypu elektronického nosu byl výsledek nejasný. V takovém případě se může uživatel rozhodnout, o jaký vzorek se jedná podle grafu (Obrázek 29). Při rozhodování je vždy důležitější osa PCA1, což je i uvedeno vedle grafu jako tip (Obrázek 30).



Obrázek 29: Výsledek měření neředěného vína



Obrázek 30: Graf pro určení vzorku

Při zhodnocení řešení a jeho možnosti je nutné jako hlavní výhodu programu uvést především to, že je uživatelsky velmi přívětivý. Co se modifikací týče, lze rychle a snadno měnit v kódu počet senzorů, což se uplatní při vylepšování prototypu. Další dobrou vlastností programu je, že knihovna pro PCA analýzu je zdarma šiřitelná. Slabší stránkou programu je nutnost dobře zvolit toleranci k určení vzorků. Nejlepší hodnota se ukáže až po delším používání. Použitý prototyp také nedával vždy stabilní hodnoty a výsledky tedy nejsou nejpřesnější. Možnost zlepšení programu je zvýšení počtu senzorů. Tato možnost je již v kódu připravena a další testování se pravděpodobně bude provádět s touto vylepšenou verzí.

11 ZÁVĚR

Elektronický nos jako přístroj pro analýzu pachů nachází stále větší uplatnění v lidských životech. Kromě identifikace potravin a určení jejich stavu může odhalit nebezpečné látky a výbušniny nebo rozeznat některé druhy nemocí. Podle zaměření je nutné vybrat odpovídající senzory pro konkrétní aplikaci. Pokud by se jednalo o zjišťování čerstvosti ovoce, musely by se vybrat adekvátní senzory a určitě by neměl chybět senzor ethenu.

Více senzorů umožňuje přesnější identifikaci potraviny, ale také to znamená větší množství dat ke zpracování. Pro redukci dat existuje mnoho metod, které se volí podle toho, jaké vztahy se chtějí zobrazit. Pro identifikaci potravin je vhodná analýza hlavních komponent, protože redukuje data, která k odlišení jednotlivých vzorků nejsou důležitá. Pokud by se v přístroji nacházel senzor, který by měřil látku, která by se ve vzorcích příliš nelišila, je možné ho zanedbat. Graf sestrojený pomocí této analýzy zobrazuje závislost vzorků pomocí dvou případně tří hlavních komponent.

Cílem práce bylo vytvořit program, který by zpracovával data naměřená experimentálním prototypem elektronického nosu. Návrh programu řeší zpracování velkého množství dat z více senzorů. Pomocí analýzy hlavních komponent PCA se vykreslí graf závislosti vzorků, aby měl uživatel přehledné informace o vzorku.

Práce byla rozdělena na dva programy, kde první slouží k vytvoření databáze a druhý ke zjištění neznámého vzorku. Oba programy komunikují s prototypem elektronického nosu pomocí USB portu v reálném čase. V prvním programu dojde při přijetí dat k uložení do databáze, kdežto v druhém se hodnoty ukládají pouze do paměti. Program pro vyhodnocení vzorku funguje jako poloautomat. To znamená, že program vypíše uživateli předpokládané názvy vzorku a pokud jich bude více jak jeden, je na uživateli, aby pomocí grafu určil, o jaký vzorek se jedná.

Pomocí experimentů se ukázalo, že program dokáže zpracovat a určit vzorky dobře. Je ale nutné vylepšit prototyp elektronického nosu, aby výsledky byly přesnější. Určení ředěného alkoholu bylo přesnější než určení druhu čaje. Je tak z důvodu, že prototyp obsahuje senzor citlivý na alkohol, kdežto na určení čajů nemá správné senzory.

Byl vytvořen a odzkoušen program pro rozpoznávání pachů pomocí prototypu elektronického nosu. Ukázalo se, že kvalita výsledků závisí na druhu měřených vzorků. Pro lepší spolehlivost výsledků je vhodné přidat další senzory do prototypu a nesmí se zapomenout přidat je i do programů pro měření.

LITERATURA

[1] XU, Guojie, et. al. *Rapid and Accurate Identification of Adulterants via an Electronic Nose and DNA Identification Platform: Identification of Fake Velvet Antlers as an Example.* Journal of sensors. London: HINDAWI LTD, 2016, s. 7. ISSN 1687-725X.

[2] MARTINEC NOVÁKOVÁ, Lenka. Čich: znovuobjevený smysl. In: HORÁČEK, Jiří, et. al. *Mozek a jeho člověk, mysl a její nemoc.* Praha: Galén, 2016. s. 85-94. ISBN: 978-80-7492-283-1

[3] Wikipedie. *Čich.* [online]. [cit. 21. 10. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/%C4%8Cich

[4] ELUC. *Čichové ústrojí.* [online]. [cit. 3. 1. 2020]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/249

[5] COUFAL, Marek. *Vliv emisí prachových částic a pachových látek z intenzivního výkrmu drůbeže na životní prostředí v okolí chovu.* České Budějovice: Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Zemědělská fakulta, 2018. Diplomová práce.

[6] VANČUROVÁ, Andrea. *Mapování problematiky obtěžování obyvatelstva pachovými látkami v ČR.* Praha: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta. Ústav pro životní prostředí, 2010. Bakalářská práce.

[7] Technické služby ochrany ovzduší Praha. *Stanovení koncentrace pachových látek.* [cit. 24. 11.2019]. Dostupné z: http://www.teso.cz/cs/mereni_pachovych_latek.php

[8] Síť ekologických poraden STEP. *Jak se měří zápach.* [cit. 24. 11. 2019]. Dostupné z: http://wiki.ekoporadna.cz/index.php?title=Jak_se_m%C4%9B%C5%99%C3%AD_z%C3%A1pach%3F

[9] HASIL, Radim. *Využití umělého nosu v senzorické analýze.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologie, 2011. Bakalářská práce.

[10] GOLIÁŠ, Jan. *Skladování a zpracování ovoce a zeleniny.* Brno: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, 2014. ISBN: 978-80-7509-195-6

[11] Instory. *Elektronický nos pozná zkažené maso.* [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z: https://styl.instory.cz/750-elektronicky-nos-pozna-zkazene-maso.html

[12] Enviweb. *Víte co je to elektronický nos?* [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z: http://www.enviweb.cz/103634

[13] CbusineZ. *CbusineZ stapt in elektronische neus.* [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z: https://cbusinez.nl/cbusinez-stapt-in-elektronische-neus/

[14] ElProCus. *How does an Electronic Nose Work?* [online]. [cit. 29. 11. 2019]. Dostupné z: https://www.elprocus.com/electronic-nose-work/

[15] JELÍNEK, Ivan. *Hmotnostní spektrometrie ve spojení se separačními metodami.* [online výukový materiál] Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Přírodovědecká fakulta UK. [cit. 28. 11. 2019]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/anl/paci/PAC/prezentace/Jelinek.pdf

[16] LibreTexts. Chemistry. *Infrared: Theory* [online] 30. 9. 2019. [cit. 29. 11. 2019]. Dostupné z: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Vibra

tional_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/Infrared%3A_Theory

[17] ZACHAŘ, Pavel a SÝKORA, David. *Plynová chromatografie.* [online výukový materiál] Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [cit. 29. 11. 2019]. Dostupné z: http://old.vscht.cz/anl/lach2/GC.pdf

[18] Wikipedie. *Elektronický nos.* [online] 19. 6. 2019 [cit. 29. 11. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektronick%C3%BD_nos

[19] ARSHAK, K, et al. *A Review of Gas Sensors Employed in Electronic Nose Applications.* Sensor Review, 2004. (vol. 24), s. 181-198. ISSN: 0260-2288

[20] B. M. Embedded solutions. *MQ6 LPG Senzor Module.* [online] [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: https://bm-es.com/product/mq6-sensor-module/

[21] JELÍNEK, Tomáš. *Detekce kyslíku pomocí senzorů plynů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2012. Diplomová práce.

[22] HIERLEMANN, Andreas. *Integrated Chemical Microsensor Systems in CMOS Technology,* 2005. ISBN: 978-3-540-27372-1

[23] KADLEC, Karel. *Katalytické senzory a jejich aplikace v analýze plynů.* [online výukový materiál] Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská. Ústav fyziky a měřicí techniky, 2011. [cit 28. 11. 2019]. Dostupné z: https://kuhv.vscht.cz/files/uzel/0017043/Katalytick%C3%A9%20senzory.pdf?redirected

[24] YE, Jipeping, JANARDAN, Ravi a LI, Qi. *Two-Dimensional Linear Discriminant Analysis.* Advances in Neural information Processing Systems 17. NIPS 2004, December 13-18, 2004, Vancouver, British Columbia, Canada.

[25] MANGLICK, Arun. *Linear Discriminant Analysis*. [online] Arun Manglick – Artificial Intelligence & Machine/Deep Learning. [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: http://arun-aiml.blogspot.com/2017/07/linear-discriminant-analysis-lda.html

[26] Matematická biologie. *Korespondenční analýza.* [online] Institut biostatiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity. [cit. 2. 12. 2019]. Dostupné z: https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--ordinacni-analyzy--korespondencni-analyza

[27] JMP. Statistical Discovery. *Example of Multiple Correspondence Analysis.* [online] [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: https://www.jmp.com/support/help/14/example-of-multiple-correspondence-analysis.shtml

[28] Matematická biologie. Shluková analýza. *Úvod.* [online] Institut biostatiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity. [cit. 2. 12. 2019]. Dostupné z: https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--shlukova-analyza--shlukova-hierarchicka-analyza--uvod

[29] VACL, Josef. *Soubor: Graf Shluková analýza souboru tuzemských a zahraničních piv.* [online] Wikipedie [cit. 12. 12. 2019]. Dostupné z: https://cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Graf_Shlukov%C3%A1_anal%C3%BDza_soubor u_tuzemsk%C3%BDch_a_zahrani%C4%8Dn%C3%ADch_piv.jpg

[30] Matematická biologie. *Analýza hlavních komponent (PCA).* [online] Institut biostatiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity. [cit. 2. 12. 2019]. Dostupné z: https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--ordinacni-analyzy--analyza-hlavnich-komponent-pca

[31] ALMAZOV, Denys. *Programové vybavení pro zpracování vícerozměrných dat ze senzorů plynů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2019. Bakalářská práce.

[32] STEJSKALOVÁ, Kristina. *Mobilní aplikace pro automatickou detekci a rozpoznání tváří.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav biomedicínského inženýrství, 2017. Bakalářská práce.

[33] SANDIPAN, Dey. *EigenFaces and A Simple Face Detector with PCA/SVD in Python.* [cit. 6. 1. 2020]. Dostupné z: https://sandipanweb.wordpress.com/2018/01/06/eigenfaces-and-a-simple-face-detector-with-pca-svd-in-python/

[34] JARKOVSKÝ, Jiří, LITTNEROVÁ, Simona. *Vícerozměrné statistické metody.* Ordinační analýzy – principy redukce dimenzionality. [online] [cit. 4. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.iba.muni.cz/esf/res/file/bimat-prednasky/vicerozmerne-statisticke-metody/VSM-06.pdf

[35] SMITH, Lindsay I. *A tutorial on Principal Components Analysis.* [online] [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf

[36] Matematická biologie. *Standardizace dat.* [online] Institut biostatiky a analýz Lékařské fakulty Masarykovy univerzity. [cit. 9. 12. 2019]. Dostupné z: https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologickych-dat--vicerozmerne-metody-pro-analyzu-dat--vicerozmerna-rozdeleni-pravdepodobnosti--transformace-dat--standardizace-dat

[37] WERNER, Tomáš. *Optimalizace*. [online] České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, katedra kybernetiky [cit. 10. 12. 2019]. Dostupné z: https://cw.fel.cvut.cz/old/_media/courses/a4b33opt/opt.pdf

[38] BENEŠ, David. *Přenosné zařízení pro detekci vůně v potravinářství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2016. Bakalářská práce.

[39] Wikipedie. *Microsoft Visual Studio.* [online] 24. 8. 2018[cit. 11. 12. 2019]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Visual_Studio

[40] BĚHÁLEK, Marek. *Programovací jazyk C#.* [online výukový materiál] Vysoká škola báňská. Technická univerzita Ostrava. [cit. 24. 5. 2020]. Dostupné z: http://www.cs.vsb.cz/behalek/vyuka/pcsharp/text.pdf

[41] Microsoft. *Access Modifiers.* C# Programming Guide. [online] 8. 3. 2020. [cit. 28. 5. 2020]. Dostupné z: https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/programming-guide/classes-and-structs/access-modifiers

[42] Wikipedie. *Accord.NET.* [online] 22. 5. 2020 [cit. 24. 5. 2020] Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Accord.NET

SEZNAM ZKRATEK

LDA	Linear diskriminant analysis, lineární diskriminační analýza.
CA	Correspondence analysis, korespondenční analýza.
HCA	Hierarchical clustering, shluková analýza.
PCA	Principal component analysis, analýza hlavních komponent.
CSV	Comma-Separated values, hodnoty oddělené čárkami.
FIFO	First in, first out, první dovnitř, první ven

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Čichové ústrojí člověka. Převzato z [4] 2
Obrázek 2: Kontrola kvality masa přenosným elektronickým nosem. Převzato z [11] ... 4
Obrázek 3: Detekce rakoviny plic pomocí elektronického nosu. Převzato z [13]..... 4
Obrázek 4: Struktura vodivostního senzoru. Převzato z [15] 6
Obrázek 5: Senzor na měření plynů na bázi vodivostního senzoru. Převzato z [20] 6
Obrázek 6: Struktura kapacitního senzoru. Převzato z [21] 7
Obrázek 7: Struktura chemodiody. Převzato z [20]..... 7
Obrázek 8: Struktura chemotranzistoru. Převzato z [19]..... 8
Obrázek 9: Struktura pelistoru. Převzato z [21] 8
Obrázek 10: Struktura SAW senzoru. Převzato z [19] 9
Obrázek 11: Struktura QCM senzoru. Převzato z [19]..... 9
Obrázek 12: Struktura optického chemického senzoru. Převzato z [20]..... 10
Obrázek 13: Příklad výstupu z lineární diskriminační analýzy (LDA). Převzato z [25] 11
Obrázek 14: Příklad výstupu z korespondenční analýzy (CA). Na základě [27] 12
Obrázek 15: Příklad výstupu ze shlukové analýzy (HCA). Na základě [29] 12
Obrázek 16: Příklad výstupu z analýzy hlavních komponent (PCA). Na základě [31].. 13
Obrázek 17: Rozpoznání obličeje pomocí metody eigenface. Převzato z [33] 13
Obrázek 18: Konstrukce experimentálního prototypu elektronického nosu 16
Obrázek 19: Grafický výstup z PCA 19
Obrázek 20: Ukázka kódu v jazyce C# v prostředí Visual Studio..... 21
Obrázek 21: Dialogové okno pro zvolení portu..... 22
Obrázek 22:Dialogové okno pro vybrání databáze..... 23

Obrázek 23: Dialogové okno pro pojmenování nového vzorku 23
Obrázek 24: Dialogové okno s naměřenými hodnotami 24
Obrázek 25: Dialogové okno pro další postup..... 24
Obrázek 26: Dialogové okno s vyhodnoceným vzorkem 25
Obrázek 27: Příklad dialogového okna s grafem 25
Obrázek 28: Graf při vyhodnocení měření maté 26
Obrázek 29: Výsledek měření neředěného vína 28
Obrázek 30: Graf pro určení vzorku 28

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Naměřené hodnoty vzorků vín 17
Tabulka 2: Průměry naměřených hodnot..... 18
Tabulka 3: Vycentrované hodnoty..... 18
Tabulka 4: Hodnoty po standardizac 18
Tabulka 5: Kovarianční matice standardizovaných hodnot..... 18
Tabulka 6: Vlastní hodnoty a vlastní vektory 19
Tabulka 7: Hodnoty pro konečné grafické zpracování 19
Tabulka 8: Výsledky experimentu rozpoznání čajů 26
Tabulka 9: Výsledky experimentu ředění (a – ředěno, n – neředěno)..... 27

PŘÍLOHA A – OBSAH CD

Přiložené CD obsahuje:

- Externí knihovny (.dll)
- Testovací databáze (.txt)
- Spustitelné soubory programů (.exe)
- Složky se zdrojovými kódy programů