

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analyzátor plynu

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš MOULE**
Osobní číslo: **E14N0106P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**
Název tématu: **Analyzátor plynu**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Návrh a realizace elektronického systému pro zpracování signálů ze senzorů plynu.

1. Udělejte rozbor senzorů různých plynů a popište jejich vlastnosti.
2. Navrhněte elektronický systém na bázi mikrokontroléru, který po doplnění odpovídajícími senzory umožní měření určitých plynů (uvažujte o systému pro 4 různé plyny).
3. Navržený elektronický systém musí umožňovat jednoduchou kalibraci (nejlépe digitálními potenciometry).
4. Navržený systém musí zobrazovat naměřené hodnoty a mít možnost připojení k osobnímu počítači.
5. Realizujte navržený systém pro dodané senzory a proveďte testy.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Milan Štok, CSc.**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

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


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku chemických plynových senzorů, které lze využít pro analýzu plyných směsí. Po rozboru principů, které senzory využívají ke své činnosti, následuje obvodové a konstrukční řešení navrhovaného analyzátoru plynu.

Hlavním cílem této práce je vytvořit funkční zařízení schopné analyzovat plyné směsi po doplnění až čtyřmi senzory. Důležitým požadavkem je jednoduché uživatelské prostředí s elektronickou kalibrací senzorů a možností sběru dat pomocí osobního počítače.

Výsledkem práce je funkční analyzátor plynu, který je schopen detekovat určité plyny v plyné směsi po doplnění odpovídajícími senzory s možností přenosu dat do osobního počítače. Parametry dosahované realizovaným zařízením jsou zhodnoceny na základě provedeného měření.

Klíčová slova

Chemický plyný senzor, senzor, analyzátor plynu, plyn, LCD displej, vývojový kit, mikrokontrolér, klávesnice, trimr, kalibrace, digitální potenciometr

Abstract

The thesis deals with the issue of chemical gas sensors, which can be used for the analysis of gas compounds. After the analysis of main principles that sensors use, the thesis is focused on peripheral and constructional solution of projected gas analyser.

The main aim of the thesis is to create a functional device capable to analyse gas compounds after addition up to four sensors. An important requirement of the device is the simple user interface with electronic calibration of sensors and with the possibility of collecting data by the personal computer.

The result of the thesis is the functional gas analyser, which is capable to detect specific gases in gas compounds after addition of appropriate sensors. On the basis of realized measurements the parameters achieved by the facility are evaluated.

Key words

Chemical gas sensor, sensor, gas analyser, gas, LCD display, development kit, microcontroller, keyboard, trimmer, calibration, digital potentiometer

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

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

.....
podpis

V Plzni dne 16.5.2016

Tomáš Moule

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Milanovi Štorkovi PhD. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty a pomohly při zpracování mé diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval panu Josefovi Luskovi za pomoc při konstruování boxu zařízení.

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	14
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	15
ÚVOD.....	17
1 SENZORY	18
1.1 POJEM SENZOR	18
1.2 ROZDĚLENÍ SENZORŮ	18
1.3 PARAMETRY SENZORŮ	19
1.4 TECHNOLOGIE VÝROBY SENZORŮ	21
1.4.1 Tenkovrstvá depozice z pevného skupenství.....	21
1.4.2 Tenkovrstvá depozice z plynného skupenství.....	23
1.4.3 Tenkovrstvá depozice z kapalného skupenství.....	24
1.4.4 Tlustovrstvá depozice	27
1.4.5 Mikrotechnologie.....	29
1.5 GENERACE SENZORŮ.....	29
2 CHEMICKÉ PLYNNÉ SENZORY.....	30
2.1 SENZORY NA FYZIKÁLNÍM PRINCIPU	31
2.1.1 Rezonanční senzory	31
2.1.2 Tepelně vodivostní senzory.....	32
2.1.3 Paramagnetické senzory kyslíku	33
2.2 SENZORY NA FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉM PRINCIPU.....	34
2.2.1 Polovodičové senzory	34
2.2.2 CHEMFET senzory	36
2.2.3 Pellistory (katalické senzory)	37
2.2.4 Elektrochemické senzory	38
2.3 OPTICKÉ A OPTOELEKTRONICKÉ SENZORY PLYNŮ.....	44
2.3.1 Infračervené analyzátoři plynu.....	44
2.3.2 Ultrafialové analyzátoři plynu.....	46
3 NÁVRH ANALYZÁTORU PLYNU	47
3.1 KONSTRUKCE A KOMPONENTY.....	47
3.1.1 Zdroj energie	48
3.1.2 Napájecí, signálová a spínací deska plošného spoje (DPS)	49
3.1.3 Vývojový kit FRDM-KL25Z.....	63
3.1.4 LCD displej.....	65
3.1.5 Klávesnice	67
4 FIRMWARE ANALYZÁTORU PLYNU.....	68
4.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ CODEWARRIOR	68
4.2 FUNKCE ANALYZÁTORU PLYNU	69

4.2.1	Menu analyzátoru plynu.....	69
4.2.2	Funkce měření.....	70
4.2.3	Funkce nastavení.....	71
4.2.4	Informace o analyzátoru plynu.....	83
5	OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI.....	84
5.1	NAPĚŤOVÝ VÝSTUPNÍ SIGNÁL.....	84
5.2	PROUDOVÝ VÝSTUPNÍ SIGNÁL.....	86
5.3	NÍZKONAPĚŤOVÝ VÝSTUPNÍ SIGNÁL.....	87
	ZÁVĚR.....	89
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	91
	PŘÍLOHY.....	93
	Příloha B – DPS napájecí části (předloha a osazovací výkres).....	95
	Příloha C – Schéma signálové části.....	97
	Příloha D – DPS signálové části (předloha a osazovací výkres).....	101
	Příloha E – Schéma spínací DPS.....	103
	Příloha F – DPS signálové části (předloha a osazovací výkres).....	104
	Příloha H – Seznam součástí.....	105
	Příloha I – Předloha pro popis panelů.....	108
	Příloha J – Výsledná podoba konstrukce – vnější pohled.....	109
	Příloha K – Výsledná podoba konstrukce – vnitřní uspořádání.....	110
	Příloha L – CD – Software.....	111

Seznam obrázků

OBR. 1.1 BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘÍCÍHO ŘETĚZCE SE SENZOREM [1]	18
OBR. 1.2 DRUHY SENZORŮ [2]	19
OBR. 1.3 VAKUOVÉ NAPAŘOVÁNÍ TENKÝCH VRSTEV [4]	22
OBR. 1.4 KATODOVÉ NAPRAŠOVÁNÍ TENKÝCH VRSTEV [4]	23
OBR. 1.5 DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV Z PLYNNÉHO SKUPENSTVÍ [4]	24
OBR. 1.6. DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV ROTAČNÍ METODOU [4].....	25
OBR. 1.7 DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV VYTAHOVACÍ METODOU [4].....	25
OBR. 1.8 DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV LANGMUIR-BLODGETTOVOU METODOU [15]	26
OBR. 1.9 DEPOZICE TENKÝCH VRSTEV INKJET TISKEM.....	26
OBR. 1.10 SÍTOTISK [4]	27
OBR. 1.11 SÍTO TISK [4].....	28
OBR. 2.1 REALIZACE SAW SENZORU [16].....	32
OBR. 2.2 TEPLTNĚ-VODIVOSTNÍ SENZOR [9].....	33
OBR. 2.3 SÍLA PŮSOBÍCÍ NA DIAMAGNETICKÉ TĚLÍSKO [1].....	33
OBR. 2.4 TERMO-MAGNETICKÝ SENZOR [10].....	34
OBR. 2.5 STRUKTURA POLOVODIČOVÉHO SENZORU [7]	35
OBR. 2.6 STRUKTURA A CHARAKTERISTIKA CHEMFET SENZORU [12]	37
OBR. 2.7 KONSTRUKCE PELLISTORU [12]	37
OBR. 2.8 MŮSTKOVÉ ZAPOJENÍ [12]	38
OBR. 2.9 KONSTRUKCE GALVANOMETRICKÉHO KYSLÍKOVÉHO SENZORU [12].....	39
OBR. 2.10 POTENCIOMETRICKÝ LAMDA SENZOR O ₂ NA BÁZI ZRO ₂	40
OBR. 2.11 LAMBDA SENZOR (A - KONSTRUKCE, B - ZÁVISLOST NAPĚTÍ NAPRÁZDNO NA λ) [1] .	41
OBR. 2.12 CLARKŮV SENZOR PRO ELEKTROCHEMICKOU ANALÝZU KAPALIN A PLYNŮ [13].....	42
OBR. 2.13 ZÁVISLOST $I = F(U, C)$ [13]	42
OBR. 2.14 AMPÉROMETRICKÁ SENZOR KYSLÍKU (A - KONSTRUKCE, B - ZÁVISLOST $I = F(U, C)$) [1].....	43
OBR. 2.15 ABSORPČNÍ SPEKTRUM NĚKTERÝCH PLYNŮ A CHARAKTERISTIKA REFERENČNÍHO INTERFERENČNÍHO FILTRU [12].....	45
OBR. 2.16 JEDNO PAPRSKOVÝ FOTOMETR [12]	45
OBR. 2.17 DVOU PAPRSKOVÝ FOTOMETR [12].....	46
OBR. 3.1 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ ANALYZÁTORU PLYNU	47
OBR. 3.2 OLOVO-KYSELINOVÝ AKUMULÁTOR [17]	49

OBR. 3.3 BLOKOVÉ SCHÉMA NAPÁJECÍ DPS	50
OBR. 3.4 ZAPOJENÍ STABILIZÁTORU	50
OBR. 3.5 ZAPOJENÍ NÁBOJOVÉ PUMPY[26]	51
OBR. 3.6 SNÍMÁNÍ NAPĚTÍ BATERIE	51
OBR. 3.7 NAPÁJECÍ DPS	53
OBR. 3.8 BLOKOVÉ SCHÉMA JEDNOHO KANÁLU	54
OBR. 3.9 PROUDOVÝ VYSÍLAČ AD694ARZ	55
OBR. 3.10 FUNKČNÍ BLOKOVÉ SCHÉMA [18].....	56
OBR. 3. 11 PŘÍSTROJOVÝ ZESILOVAČ.....	57
OBR. 3.12 OPERAČNÍ ZESILOVAČ V NEINVERTUJÍCÍM ZAPOJENÍ.....	57
OBR. 3.13 KOMUNIKACE UP/DOWN[19]	59
OBR. 3.14 PŘEVOD PROUDU NA NAPĚTÍ	60
OBR. 3.15 DĚLIČ NAPĚTÍ	61
OBR. 3.16 OMEZOVAČ NAPĚTÍ.....	62
OBR. 3.17 SIGNÁLOVÁ DPS	62
OBR. 3.18 VÝVOJOVÝ KIT FRDM-KL25Z [20].....	64
OBR. 3.19 ZAPOJENÍ VÝVODŮ [21]	65
OBR. 3.20 ALFANUMERICKÝ LCD DISPLEJ [22]	65
OBR. 3.21 ČASOVÝ DIAGRAM KOMUNIKACE PRO ZÁPIS [22].....	66
OBR. 3.22 MEMBRÁNOVÁ MATICOVÁ KLÁVESNICE [23].....	67
OBR. 4.1 VÝVOJOVÝ DIAGRAM.....	68
OBR. 4.2 STARTOVACÍ OBRAZOVKA	69
OBR. 4.3 OBRAZOVKA MENU	69
OBR. 4.4 OBRAZOVKA MEASUREMENT	70
OBR. 4.5 NABÍDKA SETTINGS	71
OBR. 4.6 OBRAZOVKA VÝBĚRU KALIBRACE	72
OBR. 4.7 OBRAZOVKA PRO VÝBĚR SENZORU	72
OBR. 4.8 NASTAVENÍ KALIBRAČNÍ HODNOTY	73
OBR. 4.9 VÝVOJOVÝ DIAGRAM MANUÁLNÍ KALIBRACE.....	74
OBR. 4.10 OBRAZOVKA NASTAVENÍ KALIBRAČNÍ KONCENTRACE	74
OBR. 4.11 OBRAZOVKA PŘI AUTOMATICKÉ KALIBRACI	75
OBR. 4.12 VÝVOJOVÝ DIAGRAM AUTOMATICKÉ KALIBRACE.....	76
OBR. 4.13 OBRAZOVKA ZADÁVÁNÍ NÁZVU SENZORU	77

OBR. 4.14 OBRAZOVKA MEASUREMENT	77
OBR. 4.15 DISPLEJ (A – PODSVÍCENÝ, B – NEPODSVÍCENÝ).....	78
OBR. 4.16 OBRAZOVKA ZADÁVÁNÍ HESLA	78
OBR. 4.17 OBRAZOVKA PŘI ŠPATNĚ ZADANÉM HESLE	79
OBR. 4.18 OBRAZOVKA NASTAVENÍ RYCHLOSTI PUMPY	79
OBR. 4.19 OBRAZOVKA BATTERY	79
OBR. 4.20 OBRAZOVKA NASTAVENÍ INDIKACE	80
OBR. 4.21 OBRAZOVKA SBĚRU DAT.....	80
OBR. 4.22 ZOBRAZENÍ PŘENESENÝCH DAT V PROGRAMU PUTTY	81
OBR. 4.23 PROGRAM RS232DATALOGGER.....	81
OBR. 4.24 OBRAZOVKA PRO ZADÁNÍ NOVÉHO HESLA	82
OBR. 4.25 OPĚTOVNÉ ZADÁVÁNÍ HESLA.....	82
OBR. 4.26 OBRAZOVKA PŘI ZADÁNÍ ŠPATNÉHO HESLA	82
OBR. 4.27 OBRAZOVKA INFORMACE.....	83
OBR. 5.1 NASTAVITELNÝ ZDROJ PROUDU [25].....	84
OBR. 5.2 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ	84
OBR. 5.3 ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ - NAPĚŤOVÝ SIGNÁL	85
OBR. 5.4 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ	86
OBR. 5.5 ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ - PROUDOVÝ SIGNÁL	86
OBR. 5.6 ZAPOJENÍ MĚŘICÍHO PRACOVISTĚ - NÍZKONAPĚŤOVÝ SIGNÁL.....	88
OBR. A.1 SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI1/2	93
OBR. A.2 SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI1/2	94
OBR. B.1 PŘEDLOHA – VRSTVA TOP	95
OBR. B.2 PŘEDLOHA – VRSTVA BOTTOM	95
OBR. B.3 OSAZOVACÍ VÝKRES – VRSTVA TOP.....	96
OBR. B.4 OSAZOVACÍ VÝKRES – VRSTVA BOTTOM	96
OBR. C.1 SCHÉMA SIGNÁLOVÉ ČÁSTI 1/4	97
OBR. C.2 SCHÉMA SIGNÁLOVÉ ČÁSTI 2/4	98
OBR. C.3 SCHÉMA SIGNÁLOVÉ ČÁSTI 3/4	99
OBR. C.4 SCHÉMA SIGNÁLOVÉ ČÁSTI 4/4	100
OBR. D.1 PŘEDLOHA – VRSTVA TOP.....	101
OBR. D.2 PŘEDLOHA – VRSTVA BOTTOM	101
OBR. D.3 OSAZOVACÍ VÝKRES – VRSTVA TOP.....	102

OBR. D.4 OSAZOVACÍ VÝKRES – VRSTVA BOTTOM	102
OBR. E.1 SCHÉMA SPÍNACÍ DPS	103
OBR. F.1 PŘEDLOHA	104
OBR. F.2 OSAZOVACÍ VÝKRES	104
OBR. I.1 PŘEDLOHA PRO POPIS PANELŮ	108
OBR. J.1 POHLED ZPŘEDNÍ STRANY	109
OBR. J. 2 POHLED ZE ZADNÍ STRANY	109
OBR. K.1 POHLED SHORA	110
OBR. K.2 POHLED Z ÚHLU	110

Seznam tabulek

TAB. 1 PŘEHLED DETEKOVATELNÝCH LÁTEK A JEJICH SORBENTY [8].....	31
TAB. 2 DEKÓDOVACÍ TABULKA [19].....	58
TAB. 3 KOMUNIKAČNÍ ROZHRANÍ UP/DOWN [19]	59
TAB. 4 NAPĚŤOVÁ CESTA - 1. KANÁL.....	85
TAB. 5 NAPĚŤOVÁ CESTA - 2. KANÁL.....	85
TAB. 6 PROUDOVÁ CESTA - 1. KANÁL	87
TAB. 7 PROUDOVÁ CESTA - 2. KANÁL	87
TAB. H.1 SEZNAM SOUČÁSTEK NAPÁJECÍ DPS	105
TAB. H.2 SEZNAM SOUČÁSTEK SIGNÁLOVÉ DPS	106
TAB. H.3 SEZNAM SOUČÁSTEK SPÍNACÍ DPS.....	107
TAB. H. 4 SEZNAM SOUČÁSTEK MIMO DPS, KONSTRUKČNÍ PRVKY, KABELY	107

Seznam symbolů a zkratek

Symboly

c	Molární koeficient
c [ppm].....	Koncentrace
I_D [A].....	Difuzní proud
l [m].....	Tloušťka vrstvy
p [kPa].....	Parciální tlak
U_{bat} [V].....	Napětí akumulátoru
U_{nab} [V].....	Nabíjecí napětí
V [m ³].....	Objem přiváděného kyslíku
V_t [m ³].....	Objem kyslíku potřebného k dokonalému spalování
ε	Extinkční koeficient dané látky
λ	Stechiometrický poměr
e	základ přirozeného logaritmu
Φ [W].....	zářivý tok vystupující z látky
Φ_0 [W].....	zářivý tok vstupující do vrstvy látky W

Zkratky

A/D.....	Analog/Digital
Ag.....	Stříbro
Al ₂ O.....	Oxid hlinitý
Au.....	Zlato
Cl ₂	Chlór
CO.....	Oxid uhelnatý
DPS.....	Deska Plošných Spojů
Fe ₂ O ₃	Oxid železitý
GaAs.....	Arsenid galitý
H ₂	Vodík
H ₂ S.....	Sulfan
CH ₄	Metan
CHEMFET.....	Chemical Field-Effect Transistor
I ² C.....	Inter-Integrated-Circuit

InSb	Indium antimonide
KBr	Bromid draselný
KCl	Chlorid draselný
LCD	Liquid-Crystal-Display
LED	Light-Emitting-Diode
LIGA	Lithographie-Galvanoformung-Abformung
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor-Field Effect Transistor
NH ₃	Amoniak
NO _x	Oxidy dusíku
O ₃	Ozon
Pb	Olovo
Pd	Palladium
pH	potential of hydrogen
Pt	Platina
PWM	Pulse-Width-Modulation
QCM	resonant Quartz Crystal Microbalance
RAM	Random Access Memory
RGB	Red-Green-Blue
SAW	Surface Acoustic Wave
SiC	Karbid křemíku
SiO ₂	Oxid křemičitý
SnO ₂	Oxid cítný
SO _x	Oxidy síry
ThO ₂	Oxid thoričitý
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
Y ₂ O ₃	Oxid yrittý
ZnO	Oxid zinečnatý
ZrO ₂	Oxid zirkoničitý

Úvod

Vlivem rozvoje techniky a ostatních průmyslových odvětví byl během posledních let navýšen objem emisí škodlivých látek. Znečišťování ovzduší má škodlivý dopad na životní prostředí a tudíž i na lidskou populaci. Pro omezení produkce škodlivých látek je nutné znát kolik, co a kdo je produkuje. Pro tyto účely slouží analytická kontrola složení plyných směsí, která se zaměřuje na koncentrace plynů v analyzovaném vzorku. Používají se samostatně pracující přístroje a systémy, označované jako analyzátoři plynů. Analyzátoři nejsou používány jen pro sledování životního prostředí, ale lze je taktéž využívat i pro detekci zdraví škodlivých plynů vznikajících při výrobních procesech a své uplatnění naleznou i v lékařských oborech. Detekce plynů nabývá stále na větším významu, a proto se jedná o velmi důležitou oblast zaměřující se na ochranu zdraví osob, bezpečnost práce a ochrnu technologií.

Diplomová práce se zabývá problematikou senzorů, které jsou využívány pro detekci plynů. Pro správné pochopení funkce chemických plyných senzorů jsou uvedeny jednotlivé principy, na kterých jednotlivé senzory pracují. Jelikož se jedná o velmi rozsáhlou oblast, nelze zahrnout veškeré senzory pokrývající danou problematiku.

Primárně se práce zabývá návrhem a konstrukcí analyzátoru plynu. Cílem je vytvořit funkční zařízení, které lze jednoduše ovládat (klávesnice a LCD displej) a je možné jej připojit k osobnímu počítači za účelem elementárního sběru dat v průběhu měření. Jedná se o univerzální zařízení, které po doplnění určitými senzory plynů, dokáže analyzovat plynou směs. Samotný návrh a realizaci lze rozdělit na dvě části: obvodové řešení a konstrukční řešení. Obvodová řešení vycházejí z analýzy a úprav ověřených zapojení v dostupných katalogových listech a ze zapojení užívaných v praxi. Konstrukční řešení byla především omezena dostupností součástek a konstrukčních prvků na trhu.

1 Senzory

1.1 Pojem senzor

Senzor je základním funkčním prvkem měřicího řetězce, který je v přímém kontaktu s měřeným prostředím. Citlivá část senzoru se nazývá čidlo. Senzory se používají k sledování fyzikální, chemické nebo biologické veličiny a převodu této veličiny na výstupní. Nejčastější výstupní veličinou je elektrický analogový nebo číslicový signál, který je určen pro další zpracování. Senzory jsou nejdůležitějším článkem měřicího řetězce a jsou na ně kladeny vysoké nároky. [1]

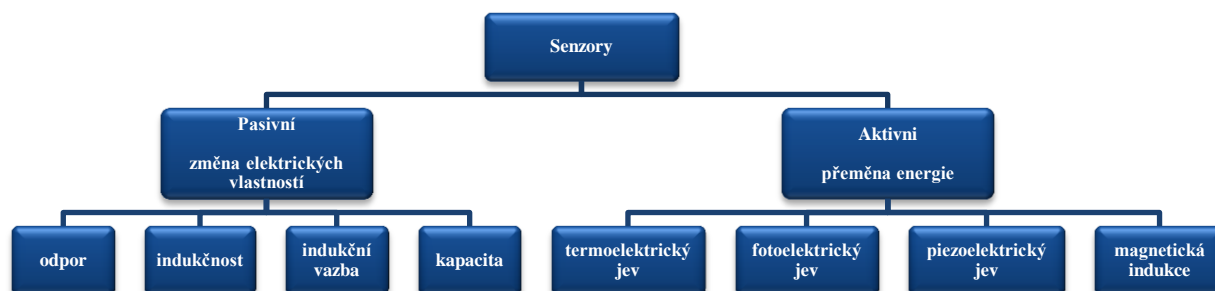


Obr. 1.1 Blokové schéma měřicího řetězce se senzorem [1]

1.2 Rozdělení senzorů

Senzory lze rozdělit na aktivní a pasivní. Pojem aktivní senzor lze označit takový senzor, který se chová jako zdroj energie při působení snímané veličiny. To znamená, že transformuje tepelnou, mechanickou, světelnou nebo chemickou energii přímo na elektrickou energii. Takovéto senzory jsou založeny na transformačních efektech, jako je např. termoelektrický, fotoelektrický, piezoelektrický nebo chemicko-elektrický jev. Jako aktivní senzor lze označit indukční senzor, termoelektrický článek, piezoelektrický článek, fotodiodu v aktivním režimu, hallovu sondu a další.

Pasivní senzory využívají změnu svých elektrických vlastností vlivem neelektrických veličin, které působí na senzor. Za elektrické vlastnosti senzorů lze považovat jejich elektrický odpor, indukčnost nebo kapacitu. Změny elektrických vlastností lze sledovat např. u kondenzátorového mikrofónu, kde dochází ke změně vzdálenosti mezi membránou a elektrodou vlivem působení akustického tlaku a tím ke změně kapacity. Jako neelektrickou veličinu lze označit teplotu, akustický tlak, záření, vlhkost a další. Pasivní senzory se liší od aktivních tím, že ke své činnosti a vyhodnocení výsledků potřebují zdroj elektrické energie. Energie může být dodávána pomocí baterie nebo externího zdroje. Některé typy senzorů lze napájet po signálovém vedení, což je výhodou z důvodu úspory kabeláže a místa pro ni. [1], [2]



Obr. 1. 2 Druhy senzorů [2]

Senzory se dále dělí podle různých hledisek na několik kategorií.

- Dle vstupní (měřené) veličiny
(teplotní, mechanické, chemické, elektrické, magnetické, biologické aj.)
- Dle výstupní veličiny
(elektrický signál, optický signál, mechanická veličina aj.)
- Dle fyzikálního principu
(odporové, indukční, kapacitní, magnetické, piezoelektrické senzory aj.)
- Dle styku senzoru s měřeným prostředím
(bezdotykové, dotykové)
- Dle transformace signálu
(aktivní, pasivní)
- Dle výrobní technologie
(elektromechanické, mechanické, elektronické, elektrické, polovodičové aj.)

[1]

1.3 Parametry senzorů

Volba senzoru závisí na jeho parametrech a na aplikaci, kde bude senzor použit. Požadované parametry jsou ve většině případů protichůdné a jejich volba je kompromisem. Základní parametry vyznačují statické a dynamické vlastnosti senzorů.

Mezi statické parametry lze zařadit:

- Statickou přenosovou charakteristiku, která zobrazuje vztah mezi vstupní a výstupní veličinou.
- Citlivost, která je definována jako sklon statické přenosové charakteristiky.
- Práh citlivosti, který udává nejmenší měřenou hodnotu detekovatelnou senzorem.
- Dynamický rozsah, který je roven intervalu dolní a horní hranice měřeného rozsahu.
- Linearitu, která udává maximální odchylku reálného neměřeného bodu od bodu na ideální statické přenosové charakteristice.
- Hysterezi
- Rozlišitelnost – udává nejmenší přírůstek výstupu senzoru, který senzor zaznamená při změně vstupu.
- Šum
- Nestabilitu a drift
- Vstupní a výstupní impedanci

Mezi dynamické vlastnosti lze zařadit:

- Přejížděvací charakteristiku, která zobrazuje výstupní veličinu senzoru v závislosti na čase při skokové změně vstupní veličiny.
- Frekvenční charakteristiku, která zobrazuje rozdíl amplitudy a fázového posunu výstupního signálu oproti vstupnímu v závislosti na frekvenci.

Na vlastnosti senzorů působí nežádoucí vlivy okolního prostředí, které je ovlivňují. Mezi rušivé vlivy lze zařadit teplotu, vlhkost, magnetické a elektrické pole, vibrace aj. Pro eliminaci chyb a nepřesností senzoru se používají vhodná obvodová zapojení senzorů a kompenzační metody. [1], [3]

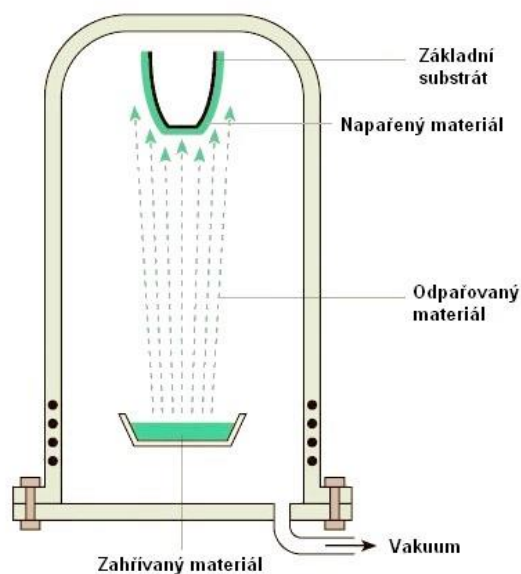
1.4 Technologie výroby senzorů

Senzory lze vyrábět tenkovrstvou, tlustovrstvou technologií a mikrotechnologii. Pomocí tenkovrstvé technologie lze vyrábět monokrystalické, polykrystalické a amorfni vrstvy křemíku, kovů a izolantů. Tlustovrstvou technologií lze vytvářet vodiče, kondenzátory a rezistory. Mikrotechnologie se využívá na výrobu monolitických senzorů.

1.4.1 Tenkovrstvá depozice z pevného skupenství

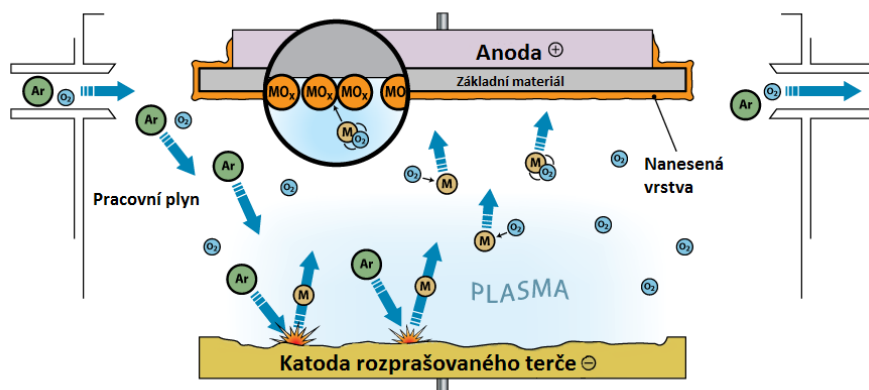
Touto technologií lze vytvářet vrstvy o tloušťkách od 1 nm do 1 μm . Pro vytváření tenkých vrstev se používá vakuová depozice a depozice z roztoků. Vakuová depozice se dále dělí na depozici z pevného a z plynného skupenství. Depozice z pevného skupenství se provádí vakuovým napařováním nebo katodovým napařováním odpařovaného materiálu (terče) na základní substrát. Základní substrát je vyroben ze skla, oceli, křemíku nebo plastu.

Napařování probíhá za sníženého tlaku. Fyzikální podstatou je vypařování materiálu, který je určen k napaření na základní substrát. Odpařovaný materiál je umístěn do speciálních nádob, které jsou vyrobeny z materiálů odolávající vysokým teplotám pohybující se v rozmezích mezi 1400 – 1800 °C. Pro výrobu se hojně využívá wolfram, molybden nebo tantal. Odpařovaný materiál lze roztavit ohmickým, laserovým ohřevem, elektronovým svazkem nebo obloukovým výbojem. Během napařování se terč nachází v roztaveném stavu a tím dochází k vypařování materiálu a vzniku nasycených par, které kondenzují na chladnějších místech, tj. základním substrátu. Celý proces probíhá v prostředí vysokého vakua při teplotách mezi 150 – 500 °C. Touto technologií lze vytvářet velmi tenké vrstvy, které jsou velice přesné. Napařování probíhá po celém povrchu základního substrátu. Výsledné motivy se vytvářejí fotolitografií a selektivním leptáním. Depozice napařováním zajišťuje spolehlivost, vysokou stabilitu, malou časovou konstantu, malé rozměry a hmotnost a nízkou výrobní cenu senzoru.



Obr. 1.3 Vakuové napařování tenkých vrstev [4]

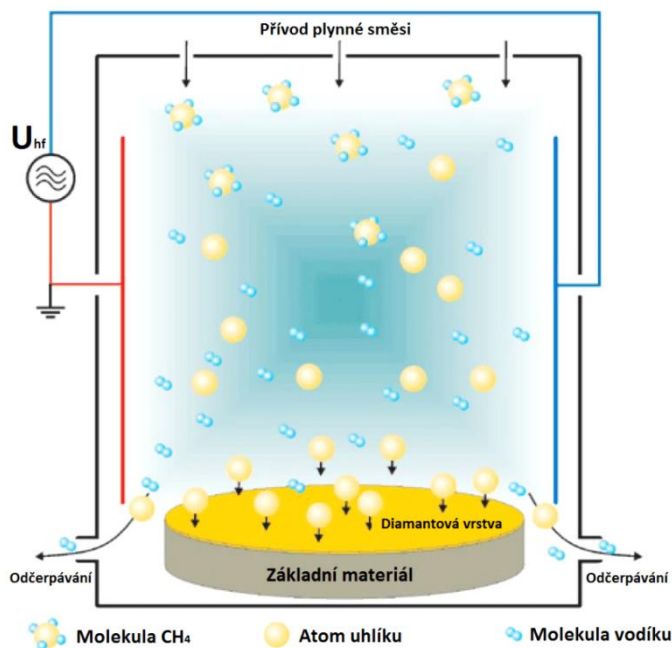
Katodové napařování patří do skupiny fyzikálních metod deponování vrstev na základní substrát. Základní substráty jsou stejné jako u metody napařování, které jsou uvedeny výše. Katodové napařování využívá vysokého napětí mezi anodou a katodou. Anodu představuje základní substrát, na který se napařuje deponovaný materiál (terč). Katoda je tvořena terčem. Mezi anodou a katodou je vlivem vysokého napětí vytvořen doutnavý výboj. Tato metoda ke své činnosti potřebuje pracovní plyn, který je do pracovní nádoby přiváděn pod tlakem. Jako pracovní plyn je využíván argon, který je pod vysokým napětím ionizován. Kladné ionty dopadají na záporný terč a záporné elektrony jsou pohlceny na uzemněné kostře komory. Kladné ionty argonu svým dopadem rozprašují terč. Částice terče kondenzují na základním materiálu a vytvářejí tenkou vrstvu. Výhodou katodového napařování je možnost nanášení těžko tavitelných materiálů. Vylepšenou metodou je magnetronové napařování. Tato metoda využívá stejného principu a navíc využívá magnetické pole v oblasti terče. Magnetické pole prodlužuje dobu setrvání elektronů v oblasti výboje a tím zlepšuje ionizaci dalších atomů pracovního plynu.



Obr. 1.4 Katodové napařování tenkých vrstev [4]

1.4.2 Tenkovrstvá depozice z plynného skupenství

Tenkovrstvá depozice z plynného skupenství patří do chemických metod, které využívají směsi chemicky reaktivních plynů (např. CH_4 , CO_2 , H_2 , apod.) k depozici tenkých vrstev. Chemicky reaktivní plynné směsi se při procesu zahřejí na vysoké teploty v rozsahu $900 - 1100\text{ }^\circ\text{C}$. Heterogenní reakcí na povrchu substrátu vzniká tenká vrstva deponovaného materiálu (Obr. 1.5). Touto metodou lze vytvořit krystalické či amorfni vrstvy chemických sloučenin, vrstvy kovů a polovodičů. Ve srovnání s metodou založenou na principu fyzikálního deponování materiálů (napařování a napařování) jsou náklady na výrobu zařízení a řízení procesu nižší. Nevýhodou je vysoká energetická náročnost na vytváření vysokých teplot při procesu a dlouhý pracovní cyklus. Pracovní cyklus trvá osm až deset hodin dle požadované tloušťky deponované vrstvy na základním materiálu. Výhodou depozice z plynného skupenství je vysoká přilnavost vrstev a odolnost vůči opotřebení.

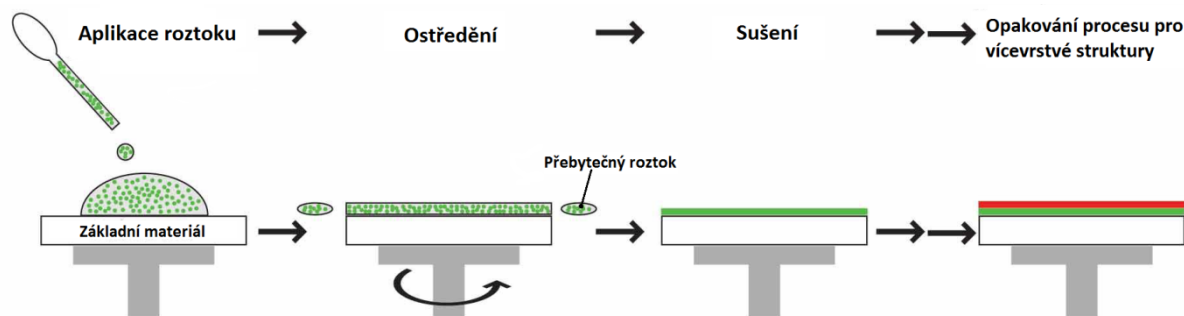


Obr. 1.5 Depozice tenkých vrstev z plynného skupenství [4]

1.4.3 Tenkovrstvá depozice z kapalného skupenství

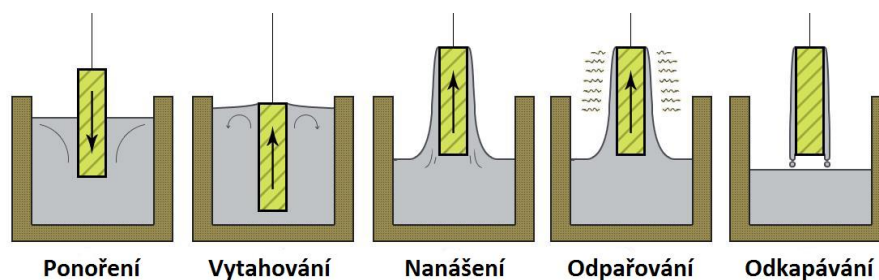
Depozici tenkých vrstev z kapalného skupenství lze vytvořit čtyřmi metodami. Rotační, vytahovací, Langmuir-Blodgettovou metodou a InkJet tiskem. Tyto metody nepotřebují k vytvoření tenké vrstvy prostředí se sníženým tlakem ani vysoké teploty a tím jsou méně energeticky náročné.

Rotační metoda využívá odstředivých sil k rozptýlení nanášené vrstvy po celém povrchu základního materiálu. Tenké vrstvy jsou nanášené ve formě roztoků, které jsou složeny z rozpouštědel a materiálů určené pro výsledné vrstvy (např. oxid titaničitý). Roztok požadovaného složení výsledné vrstvy je aplikován do středu základního materiálu a následným rotačním pohybem je vytlačován ke krajům (Obr. 1.6). Přebytný roztok je odstředivými silami vytlačován mimo základní materiál. Tloušťka vrstvy je závislá na viskozitě roztoku a rychlosti odstředění, která se pohybuje mezi 1500 – 6000 ot./min. Dále je sledován čas, po který proces probíhá. Proces odstředění může trvat 10 s až 5 minut. Vytvořená vrstva je následně vysušena určitou teplotou, kde dochází k odpaření rozpouštědel. Touto technologií lze vytvářet vícevrstvé struktury. Po vysušení první vrstvy se opakuje celý proces pro vytvoření vrstvy další.



Obr. 1.6. Depozice tenkých vrstev rotační metodou [4]

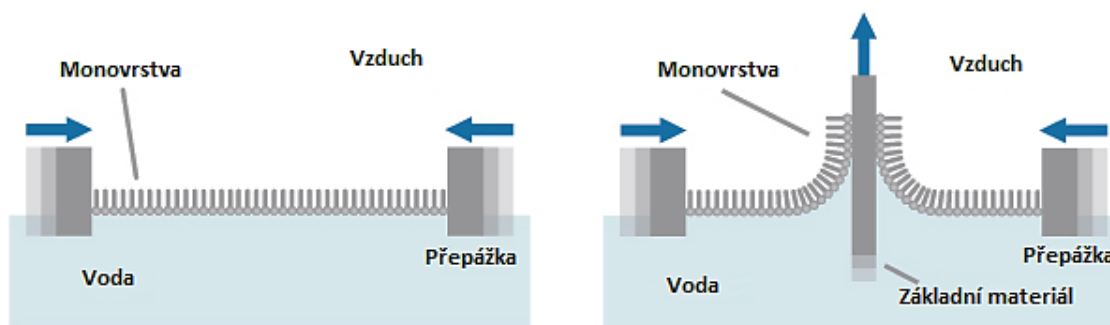
Dalším procesem výroby tenkých vrstev je metoda vytahování. Metoda je založena na ponořování základního materiálu do roztoku a vytahováním konstantní rychlostí. Roztok je opět složen z rozpouštědla a materiálu, který určuje složení vrstvy. Tloušťka vrstvy je závislá na viskozitě, koncentraci kapaliny a rychlosti vytahování. Rychlost vytahování základního materiálu z lázně se pohybuje mezi 0,1 – 100 mm/s. Čím rychleji se základní materiál vytahuje, tím lze vytvořit větší tloušťku vrstvy (Obr. 1.7). Po vytažení základního materiálu se vrstva vysuší při určité teplotě, čímž se odstraní veškerá rozpouštědla. Tato metoda je podobná metodě rotační, která je zmíněná výše. Obě metody se však vyznačují zvýšenou spotřebou výrobního roztoku a z tohoto důvodu byly hledány metody jiné, které by netrpěly těmito nedostatky. K méně náročným metodám na spotřebu roztoku lze zařadit Langmuir-Blodgettovu metodu nebo InkJet tisk.



Obr. 1.7 Depozice tenkých vrstev vytahovací metodou [4]

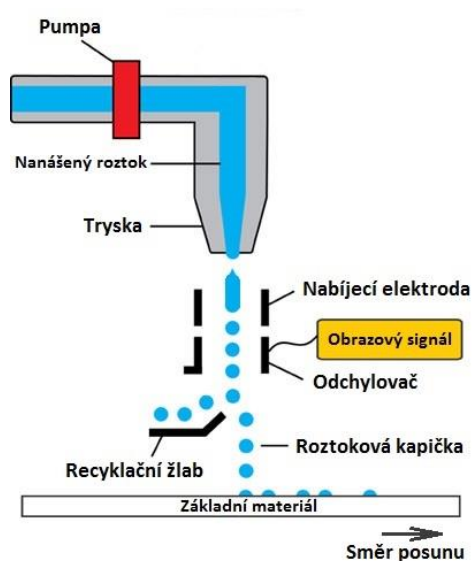
Langmuir-Blodgettova metoda je určena pro výrobu monovrstev, dosahují tloušťky o velikosti molekul. Principem této metody je nanesení filmu monovrstvy z organického materiálu na povrch kapaliny. Molekuly netvoří na povrchu souvislý film samy od sebe, ale jsou k sobě přihlíženy prostřednictvím pohyblivých přepážek a tím tvoří souvislý film připomínající tenkou fólii. Základní materiál je svisle ponořen přes film monovrstvy do nádoby a po ustálení následně vytažen. Při vytahování dochází k přilnutí molekul k základnímu materiálu a tím i k tvorbě tenké vrstvy o tloušťce molekuly (Obr. 1.8). Při

vytahování jsou molekuly udržovány v souvislé vrstvě pohyblivými přepážkami, aby nedocházelo k narušení filmu. Opakováním procesu lze vytvořit vícevrstvé struktury velice přesných rozměrů, protože vždy je nárůst vrstvy o rozměr jedné molekuly.



Obr. 1.8 Depozice tenkých vrstev Langmuir-Blodgettovou metodou [15]

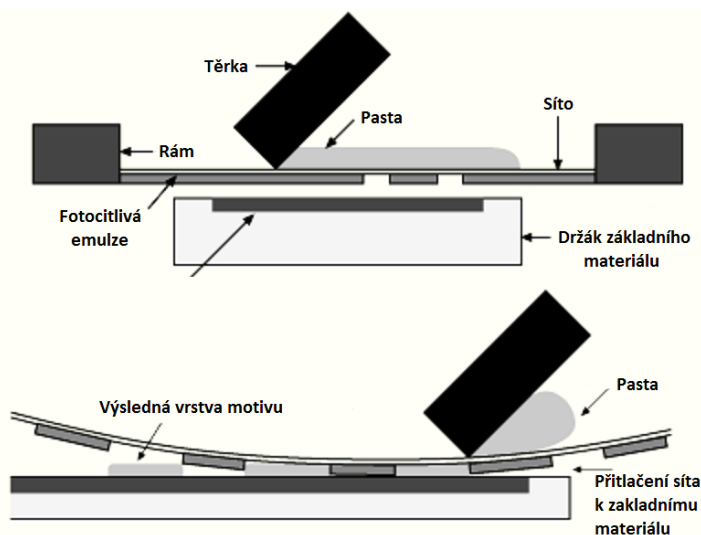
Poslední metodou k depozici tenkých vrstev z roztoků je InkJet tisk. Metoda je založena na kontinuálním tisku. Tiskárna vytváří nepřetržitý proud roztoku, který je určený k depozici na základní materiál. Nabíjecí elektroda vytváří z kontinuálního proudu roztoku jednotlivé kapičky. Tyto kapičky dále procházejí odchylovačem, na který se přivádí obrazový signál. Jeho funkcí je vychylování kapiček, které nejsou určeny pro nanesení na základní materiál a tím se vytvářejí požadované obrazce. Nežádoucí kapičky jsou vychýleny do recyklačního žlabu, který ústí zpět do zásobníku a roztok je opět použit (Obr. 1.9). Kontinuální InkJet tisk je velice rychlý a lze ho používat pro depozici větších rozměrů základního materiálu.



Obr. 1.9 Depozice tenkých vrstev InkJet tiskem

1.4.4 Tlustovrstvá depozice

Tlustovrstvými procesy lze vytvářet vrstvy nad 1 μm . Využívá se zde metoda sítotisku, šablonového tisku a dispersingu pro vytváření vrstvy na základní materiál, který je ve formě keramické či plastové podložky. Nejčastěji se tlustovrstvá technologie využívá k výrobě vodičů, rezistorů a kondenzátorů. Proces začíná u výroby požadovaného motivu na síto, které je napnuté v hliníkovém rámu. Na síto je nanášena po celé ploše fotocitlivá emulze nebo folie, na kterou se přiloží vzor motivu a následným osvitem se vytvrdí. Po odstranění nevytvrzené emulze je síto s motivem připraveno k použití. Při sítotisku se síto nedotýká základního materiálu, ale je umístěno těsně nad ním (Obr. 1.10). Požadované vrstvy se nanášejí na základní substrát ve formě past, které se po aplikaci na základní materiál vypálí. Pasta je těrkou protlačována skrz oka síta, která nejsou zaplněna vytvrzenou fotocitlivou emulzí nebo folií. Vrstva pasty má tloušťku 1/3 tloušťky síta. Výsledná vrstva závisí na úhlu mezi těrkou a sítom, rychlostí těrky, vzdáleností síta od základního materiálu, průtahem síta a viskozitě pasty. Síta mohou být vyrobená z polyesteru, polyamidu nebo kovu. Kovová vlákna mají za použití tenčích vláken stejnou pevnost, jako ta plastová, tím mají větší otevřenou plochu a je umožněn detailnější tisk motivů. Ve většině případů se používají polyesterová síta, která umožňují silné napnutí v rámu a nepřijímají vlhkost. Polyamidová síta mají větší průtažnost, tudíž jsou vhodné pro sítotisk na nerovný podkladový materiál.



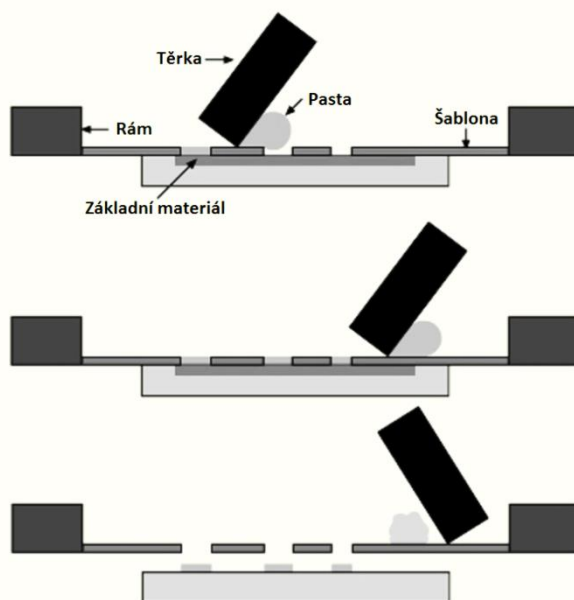
Obr. 1.10 Sítotisk [4]

Pasty mohou být anorganické nebo organické. Organické pasty mohou být odporové nebo dielektrické. Odporové organické pasty jsou založeny na obsahu grafitu. Dielektrické pasty jsou využívány k odizolování vícevrstevných systémů a překřížených spojů.

Anorganické pasty tvoří tři základní složky. Funkční složka charakterizuje vlastnosti pasty. Pasty mohou být vodivé, dielektrické, odporové, pájecí nebo speciální. Podle použití příměsí lze docílit požadované vlastnosti výsledné vrstvy. Vodivé vrstvy jsou tvořeny kovovými částicemi, izolační vrstvy dielektrickými částicemi a odporové vrstvy směsí drahých kovů nebo oxidy. Tavnivová složka je druhou složkou, která je tvořena skelnou firitou. Funkcí této složky je vytvoření vazby mezi funkční složkou a základním materiálem. Přilnutí vrstvy k základnímu materiálu dochází při výpalu, kde dochází k měknutí pasty. Vrstvy se vyplují při teplotě 850 °C. Poslední pojivová složka neurčuje výsledné vlastnosti vrstvy, ale udává viskozitu pasty a při výpalu se zcela odpaří.

K výrobě tlustých vrstev se také využívá šablonový tisk. Princip šablonového tisku je podobný jako u sítotisku. Šablony jsou vyrobené z oceli, mosazi nebo niklu. Vzory jsou vyrobeny chemickým leptáním, galvanoplastikou nebo laserem. U šablonového tisku nelze vytvářet jemné motivy. Tloušťka vrstvy totiž odpovídá tloušťce šablony. Na rozdíl od sítotisku je šablona přiložena na základní materiál a po aplikaci celého motivu je vyzvednuta (Obr. 1.11). Vrstva se vytvrdí pomocí vysoké teploty v peci, jako je tomu u sítotisku.

Tlustovrstvou technologií lze vytvářet hybridní integrované obvody. Pomocí této technologie dochází ke změně rozměrů, ale i k minimalizaci nežádoucích parametrů, jako jsou parazitní kapacity, indukčnosti a odpory vodivých cest. Tím je možné docílit zrychlení zpracování signálu a snížit šum.



Obr. 1.11 Síto tisk [4]

1.4.5 Mikrotechnologie

Mikrotechnologie je využívána k výrobě integrovaných obvodů. Technologie využívá oxidaci povrchu, litografii, epitaxi, iontovou implementaci a metalizaci. Těmito metodami lze vyrábět monolitické senzory, které jsou nejčastěji vyráběny na substrát monokrystalického křemíku. Pro náročnější aplikace se využívají odolnější materiály, jako např. diamant, SiC, InSb a GaAs. Spojením speciálních postupů spolu s klasickými mikrotechnologiemi, které jsou uvedeny výše, lze vyrábět senzory s označením MEMS (Mikro-Elektro-Mechanické-Systémy). Mezi speciální postupy patří anizotropní leptání, mikroobrábění a LIGA proces. Těmito postupy lze vytvářet trojrozměrné a pohyblivé struktury. Technologií MEMS lze vytvářet kromě senzorů, také akční členy, které lze integrovat spolu se senzorem do kompaktního systému. [1]

1.5 Generace senzorů

Vývoj senzorů se postupně během let vyvíjel. V dnešní době lze senzory zařadit celkem do tří generací.

Ke konstrukci první generace senzorů se využívá základních fyzikálních jevů. Senzory této generace nemají normalizovaný výstupní signál. Mezi představitele této generace patří např. tenzometr, termočlánek, piezoelektrický, odporový, indukční, kapacitní senzor a další. Senzory první generace jsou nejčastěji využívány v robotice a automatizaci. V dnešní době je vývoj této generace zastaven a jen ve výjimečných případech dochází k úpravě novou technologií nebo materiály.

Druhá generace senzorů je založena na polovodičové technologii a fyzikálních jevech spojenými s polovodiči. V této generaci dochází k normalizaci výstupního signálu a zlepšení parametrů senzorů. Zmenšují se rozměry, zlepšuje se přesnost, citlivost a dynamické vlastnosti. Vlivem vývoje elektroniky dochází k částečné nebo úplné integraci elektronické a informační části měřicího řetězce s čidlem. Lze vyrábět řetězy nebo matice senzorů v jednom kompaktním pouzdře. V této generaci vznikly mikro a opto-elektronické senzory, např. tlakové membránové křemíkové senzory nebo optické vláknové senzory. Senzory jsou využívány v robotice a stále je tato generace vyvíjena s postupným vývojem výrobních technologií.

Třetí generace je vyvíjena z důvodů vyšších požadavků na rozsah použitelných frekvencí, přenosových rychlostí, šířky přenášeného pásma a na přenos signálu na větší vzdálenosti. Senzory třetí generace jsou založeny na optické technologii. V předchozích

generacích je využíván převod vstupní fyzikální veličiny na výstupní elektrický signál. V třetí generaci je vstupní fyzikální veličina převáděna na výstupní optický signál. S možností přenosu signálu prostřednictvím optického média lze senzory instalovat do prostředí, kde se vyskytuje rušení elektrickými a magnetickými poli. Do této generace patří optoelektronické a světlovodné senzory. Světlovodné senzory využívají přímé ovlivňování optického média fyzikální neelektrickou veličinou a dochází ke změně parametrů světlovodu. Senzory tohoto typu dosahují vyšší citlivosti a menších rozměrů než senzory předchozích dvou generací. Třetí generace senzorů je stále ve vývoji a jejich uplatnění je ve všech oblastech průmyslu. [5], [6]

2 Chemické plynné senzory

Chemické plynné senzory se uplatňují v různých aplikacích. Lze jimi monitorovat životní prostředí a detekovat koncentraci toxických látek v ovzduší (např. NO_x , SO_x , CO , O_3 , H_2S , NH_3 aj.) tvořenými výrobními závody, automobilovým provozem, lokálním vytápěním a jinými zdroji znečištění. Na pracovištích, kde se pohybují lidé, se jimi monitorují nebezpečné koncentrace škodlivých látek, které mohou ohrožovat lidské životy. Dále lze chemické plynné senzory využít v lékařství, potravinářství, automobilovém průmyslu, vojenství a dalších odvětvích průmyslu. Chemické plynné senzory jsou založeny na třech principech vzájemného působení senzoru a plynné látky. [7]

Fyzikální princip využívá vzájemné působení molekul mezi sledovanou látkou a senzorem, při kterém nedochází k chemické změně sledované látky. Senzory pracující na tomto principu využívají změnu hustoty, tepelné vodivosti, indexu lomu, absorpce a dalších fyzikálních veličin. Tyto veličiny se mění v závislosti na koncentraci sledovaného plynu. Výhodou senzorů pracujících na fyzikálním principu je malá časová konstanta. Tyto senzory jsou velice rozšířené, ale jsou použitelné pouze pro binární a terciální směsi plynů. Důvodem je špatná selektivita a odolnost proti vnějším vlivům prostředí (tlak, teplota aj.). Selektivita určuje schopnost senzoru analyzovat určitou složku směsi bez ovlivnění ostatními složkami ve směsi.

Fyzikálně-chemický princip využívá interakce a výměny elektronů v molekulách sledované látky a povrchem čidla, což vede k chemické proměně molekul. Při této chemické reakci se sleduje určitá fyzikální veličina. Může jít o elektrický odpor, impedanci, teplotu, parciální tlak aj. Výhodou senzorů založených na fyzikálně-chemickém principu je vysoká selektivita, nevýhodou je delší dopravní zpoždění a časová konstanta.

Optický a optoelektronický princip využívá vzájemného působení mezi absorbujícími

elektromagnetickým vlněním a molekulami měřené látky. V elektronovém systému dochází k vybuzení vnitřních stavů pomocí záření, které může být umístěno ve viditelném, ultrafialovém, infračerveném a mikrovlnném spektru. Sensory založené na tomto principu mají největší selektivitu, důvodem je jednoznačnost absorpčních spekter pro určité měřené složky plynných směsí. [1]

2.1 Sensory na fyzikálním principu

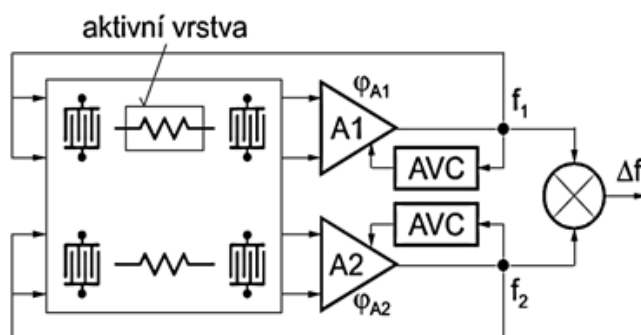
2.1.1 Rezonanční senzory

Rezonanční senzory využívají piezoelektrický jev pro analýzu plynů. Existují dva druhy senzorů pracujících na různých principech. První princip využívá krystalový výbrus zapojený v oscilátoru. Jedná se o oscilátor z křemene SiO₂ s vysokou pevností, chemickou odolností a malou teplotní roztažností. Na povrchu krystalu je nanášena chemicky citlivá adsorpční (absorpční) vrstva, která absorbuje analyzovaný plyn. Absorpcí dochází ke zvýšení hmotnosti krystalu, což vede ke změně frekvence oscilací. Z této změny frekvence lze odvodit koncentraci analyzovaného plynu. Například pro detekci par rtuti je jako sorbent využíváno zlato. U některých sorbentů je zapotřebí obnovit sorpční vlastnosti. K obnově sorpce dochází zahřátím nanášené citlivé chemické vrstvy senzoru (např. 200°C u desorpce zlata). Sensory pracující na tomto principu se označují jako QCM (resonant Quartz Crystal Microbalance – rezonanční krystalové mikrováhy). V tabulce 1 jsou uvedeny látky, které jsou detekovatelné senzory QCM. [1], [8]

Tab. 1 Přehled detekovatelných látek a jejich sorbenty [8]

Detekovatelné látky	Používané sorbenty
Uhlovodíky	silikonový olej
Aromáty	β, β-diptopoinitril, polyethelenglykol 400
Nenasycené uhlovodíky	glycerin s dusičnanem stříbrným
Chlorované uhlovodíky	polyanilin, polystyren
Vzdušná vlhkost	polypyrrol, silikagel, nafion, molekulová síta, oxid hlinitý
Sulfan	octan olovnatý, stříbro, měď
Amoniak	kyselina askorbová, extrakt papriky
Amoniak, Oxidy dusíku, Oxid siřičitý, Sulfan	polypyrrol
Organofosfáty	izonitrilobenzoyloctan sodný, komplex cobalt-izonitrilobenzoylacetone

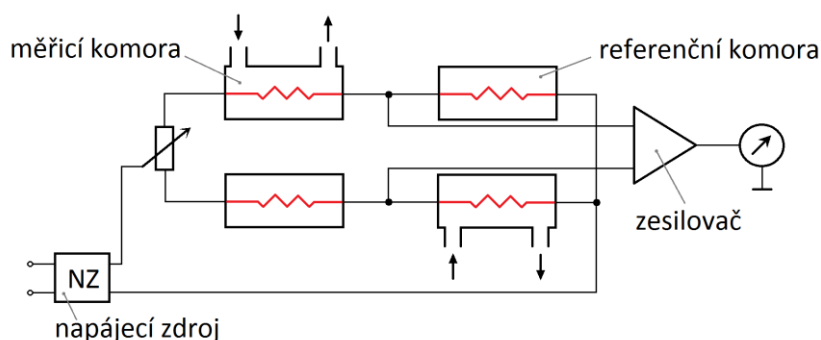
Druhý princip využívá zpoždovací vedení s postupnou akustickou vlnou. Senzory využívající tento princip se označují jako SAW (Surface Acoustic Wave – s povrchovou akustickou vlnou). Senzory se skládají z piezoelektrické destičky, na které jsou dva páry hřebenových elektrod a každý pár představuje vysílač a přijímač akustické vlny. Přivede-li se na vstupní měnič (vysílač) vysokofrekvenční napěťový signál, dochází k deformaci krystalu vlivem piezoelektrického děje. To má za následek vznik akustické vlny, která se šíří povrchem substrátu směrem k výstupnímu měniči (přijímači) a ve zpoždovacím vedení dochází ke zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem. Mezi jeden pár elektrod je nanášena chemicky citlivá adsorpční (absorpční) vrstva, která absorbuje analyzovaný plyn. Zvýšením hmotnosti dochází ke zvětšení zpoždění mezi vstupním a výstupním signálem. Zpoždění z každého páru hřebenových elektrod je porovnáváno pomocí komparátorů. V závislosti na koncentraci plynu se mění rozdíl frekvence Δf (Obr. 2.1). [1], [8]



Obr. 2.1 Realizace SAW senzoru [16]

2.1.2 Tepelně vodivostní senzory

Tepelně vodivostní senzory pracují na principu tepelné vodivosti různých plynů. Senzor je složen ze dvou měřících a dvou referenčních komor, které jsou zapojeny do Wheatstoneového můstku (Obr. 2.2). Do měřících komor je přiváděna analyzovaná směs a referenční komory jsou naplněny známým plynem, který bude analyzován ve směsi. V každé komoře je umístěn platinový drátek, který je zahříván protékajícím konstantním proudem na teplotu 100 °C až 150 °C. Při změně koncentrace analyzovaného plynu dochází ke změně tepelné vodivosti a tím i k zahřátí platinového drátku. Vnitřní odpor platinového drátku je závislý na jeho teplotě a dochází k rozvážení Wheatstoneova můstku a změně rozdílového napětí. Čím je vyšší rozdílové napětí můstku, tím je větší koncentrace analyzované směsi v měřících komorách než v komorách referenčních. [9]

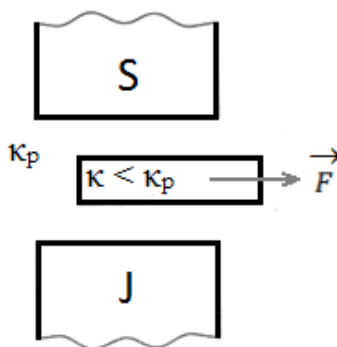


Obr. 2.2 Teplotně-vodivostní senzor [9]

2.1.3 Paramagnetické senzory kyslíku

Kyslík má mezi všemi plyny největší kladnou magnetickou susceptibilitu a lze využívat jeho magnetické vlastnosti. Magnetická susceptibilita popisuje chování látky ve vnějším magnetickém poli. Paramagnetické senzory kyslíku jsou založeny na magneto-mechanickém a termo-magnetickém principu.

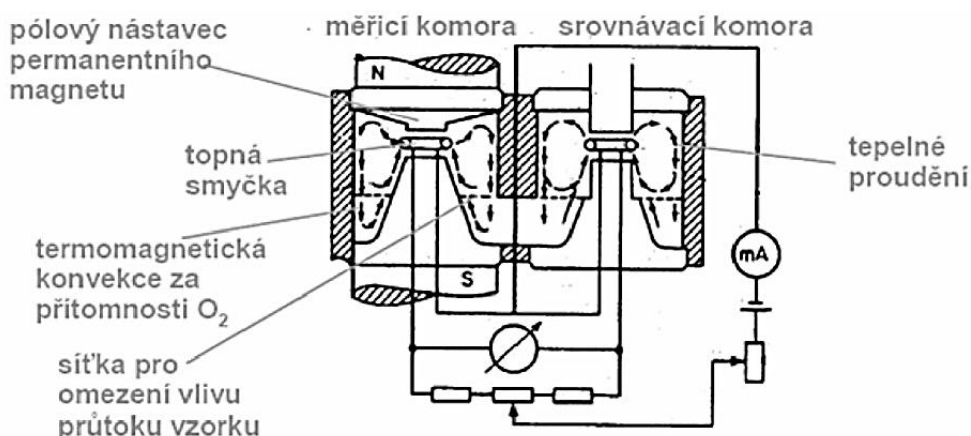
Magneto-mechanický princip využívá paramagnetických vlastností kyslíku a do určitého objemu V kyslíku je vloženo diamagnetické tělísko (např. ampule s dusíkem, křemík napuštěný dusíkem). Na toto tělísko působí síla, která ho vytlačuje z nehomogenního magnetického pole (Obr. 2.3). Tento pohyb je velmi malý a ke snímání se využívá optických prostředků. Na diamagnetickém tělísku je připevněno zrcátko a podle obsahu kyslíku se mění výchylka a tím i dopad odraženého paprsku na snímač. [1]



Obr. 2.3 Síla působící na diamagnetické tělísko [1]

Termo-magnetický princip je založen na zahřívání kyslíku nad Curierovu teplotu. Zahřívání dochází okolo topného drátu, který je umístěn v měřicí komoře v blízkosti pólových nastavců magnetu. Vedle měřicí komory je umístěna referenční komora, která má stejný tvar i pólové nastavce (Obr. 2.4). Ty však nejsou připojeny na magnet. Topné dráty obou komor jsou vyvedeny do Wheatstoneova můstku, kde se vyhodnocují vnitřní odpory

obou topných drátů. Vnitřní odpor je závislý na teplotě topného drátu. Zahřátý kyslík je vytlačován do míst s nižší intenzitou magnetického pole chladnějším kyslíkem a tím dochází k magnetickému proudění (tzv. magnetický vír) a spolu s prouděním plynu dochází k ochlazení topného odporu. Do referenční komory se také přivádí kyslík, který je zde zahříván stejně jako v měřicí komoře. S chybějícím magnetickým polem v komoře nedochází k „magnetickému víru“ a topný drát je ochlazován pouze prouděním plynu což způsobí rozdílné hodnoty vnitřních odporů topných drátů a Wheatstoneův můstek se rozváží. [10]



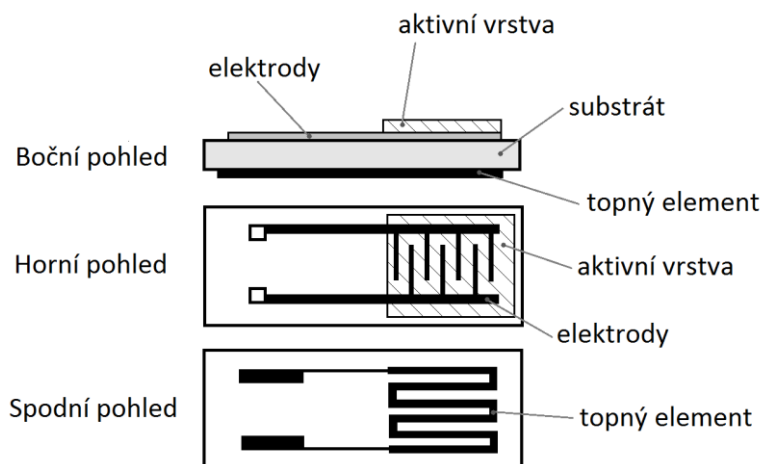
Obr. 2.4 Termo-magnetický senzor [10]

2.2 Senzory na fyzikálně-chemickém principu

2.2.1 Polovodičové senzory

Polovodičové senzory se využívají pro detekci redukčních nebo oxidačních plynů. Existují senzory s povrchovou (adsorbční) a objemovou (absorpční) detekcí.

Senzory s povrchovou detekcí jsou složeny z elektricky izolačního substrátu, topení, měrných elektrod a aktivní vrstvy (Obr. 2.5).



Obr. 2.5 Struktura polovodičového senzoru [7]

V převážné většině je substrát vyroben z Al_2O_3 v různém provedení (např. korund, safír aj.). Základní substrát je dobrý vodič tepla s malou teplotní roztažností, který nemění své elektrofyzikální vlastnosti v závislosti na složení okolní atmosféry. Pro funkci senzoru je zapotřebí zahřátí aktivní vrstvy. Ohřev se provádí protékajícím proudem skrz platinový, platinoiridiový nebo wolframový meandr, který je umístěn na spodní nebo horní straně substrátu. Aktivní vrstva je vyrobena z polovodičového materiálu s vhodnými dopanty a dělí se na vrstvu typu N a P. U materiálu je důležitá šířka zakázaného pásma, měrná vodivost a stabilita v kyslíkové atmosféře. Anorganická aktivní vrstva je vyrobena spékáním zrn oxidů kovů jako např. SnO_2 , ZnO , Fe_2O_3 , TiO_2 aj. Organické aktivní vrstvy jsou zpravidla vytvořeny vysokomolekulárními (acetylacetonáty, ftalocyaniny) nebo polymerními (polypyrrol, polyanilin) látkami. Ke zrychlení detekce je potřeba zahřát aktivní vrstvu na pracovní teplotu ($80 - 600\text{ }^\circ\text{C}$). Princip senzorů s povrchovou detekcí je založen na tzv. chemisorpci. Chemická reakce probíhá v pracovní atmosféře s přebytkem kyslíku (20,95 %) mezi kyslíkem a aktivní vrstvou. Chemisorpcí kyslíku se odčerpávají volné elektrony z materiálu aktivní vrstvy a dochází ke vzniku vyprázdněné oblasti a potenciálové bariéry na hranici zrn. To vede ke zvýšení odporu senzoru, který se ustálí na konstantní hodnotě. Je-li aktivní vrstva vyrobena z polovodiče typu N, dochází v přítomnosti redukujícího plynu (H_2 , CO , CH_4 , etanol aj.) k chemické reakci s povrchově sorbovaným kyslíkem a odčerpané elektrony kyslíkem se uvolní. To způsobí zmenšení vyprázdněné oblasti na hranici zrn a změnu odporu senzoru, který je snímán pomocí elektrod umístěných na aktivní vrstvě. V přítomnosti oxidujících plynů (O_3 , NO_2 , Cl_2 aj.) dochází k dalšímu odčerpání volných elektronů a nárůstu odporu senzoru. Pro aktivní vrstvu typu P platí opačný

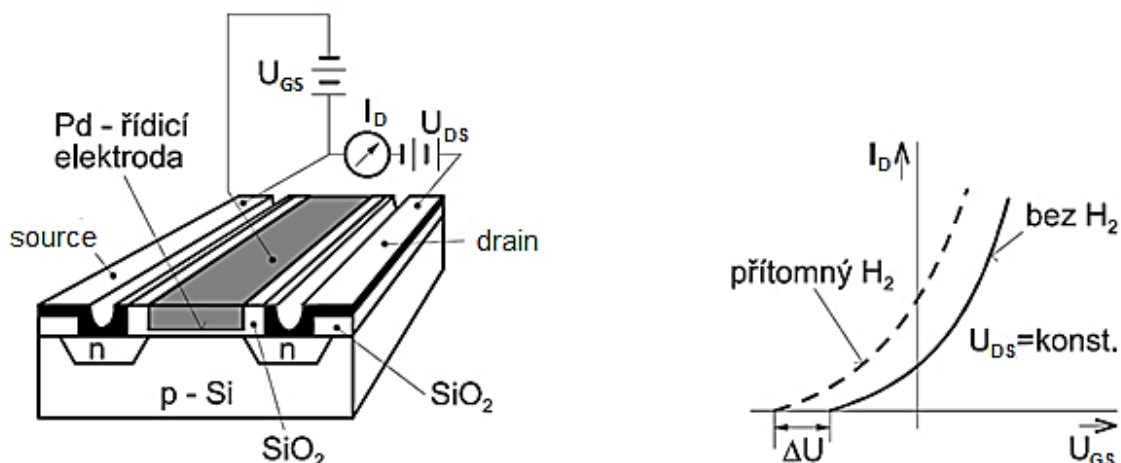
princip. Pro redukční plyny odpor aktivní vrstvy roste a pro oxidační plyny zase klesá. Tyto senzory jsou schopné zachytit malé koncentrace měřeného plynu (jednotky ppm). Hodnota odporu senzoru dosahuje maximálně jednotek M Ω z důvodu nárůstu šumu. [7]

Senzory s objemovou detekcí jsou založené na změně stechiometrické struktury aktivní vrstvy. Aktivní vrstva je vyrobena z oxidů TiO₂, BaTiO₃, SrTiO₃ aj. Změna stechiometrické struktury probíhá při vysokých teplotách (až 900 °C), při kterých dochází ke změně závislosti vodivosti na parciálním tlaku měřeného plynu. Parciální tlak je tlak měřeného plynu, který se podílí na celkovém tlaku přiváděné směsi.

Polovodičové senzory plynů mají nelineární charakteristiku, nízkou selektivitu a jsou závislé na vlhkosti, teplotě a proudění plynné směsi. Výhodou jsou malé rozměry a nízká výrobní cena. Významným výrobcem polovodičových senzorů je japonská firma Figaro engineering, která vyrábí senzory s označením TGS. Výrobce nabízí okolo 200 senzorů plynů a par. U každého typu jsou uvedeny detekční limity koncentrace měřeného plynu a vhodné použití. [1]

2.2.2 CHEMFET senzory

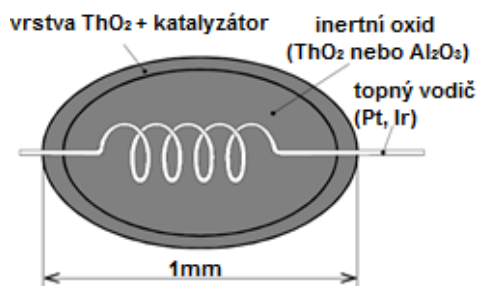
CHEMFET je chemicky citlivý tranzistor řízený polem, který využívá princip MOSFET tranzistorů. CHEMFET je tvořen základním křemíkovým polovodičovým substrátem typu P. Řídicí elektroda je vyrobena z Palladia (Pd), které je citlivé na vodík a na plyny s možností odštěpení vodíku (např. NH₃, H₂S aj.). Toto hradlo je od základního substrátu a obou elektrod izolováno oxidem SiO₂, TiO₂ nebo ZnO. Elektrody Drain a Source jsou tvořeny polovodičovým substrátem typu N. Na řídicí elektrodu je přiváděna analyzovaná směs plynů. Jsou-li v plynné směsi obsaženy molekuly vodíku (H₂), plyn je rozkládán na povrchu řídicí elektrody vyrobené z Palladia. Rozkladem plynu vznikají odštěpené atomy, které se adsorbují na řídicím hradle. Tyto atomy dále pronikají až na rozhraní hradlo-izolant, kde tvoří dipólovou vrstvu. Vytvořená vrstva mění potenciál přechodu a vodivost kanálu mezi Drainem a Sourcem. Vodivost kanálu u CHEMFETu je ovlivňována i oxidačními plyny (např. O₂, Cl₂) a při vyšších teplotách jsou schopni detekovat redukční plyny CO obsažené ve směsích s H₂. Chování charakteristiky CHEMFETu při detekci H₂ je znázorněno na obrázku (*Obr. 2.6*). [11]



Obr. 2.6 Struktura a charakteristika CHEMFET senzoru [12]

2.2.3 Pellistory (katalické senzory)

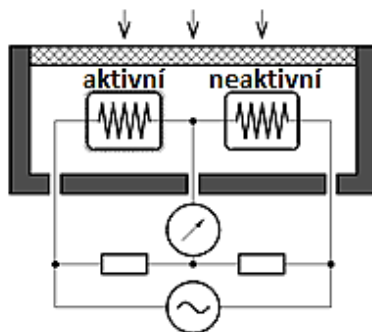
Pellistory se používají pro detekci hořlavých a výbušných plynů obsažených ve vzduchu (metan, butan, propan, CO aj.). Princip pellistoru je založen na změně odporu topného meandru s teplotou. Pellistor má tvar kuličky nebo válečku o velikosti kolem 1 mm (Obr 2.7).



Obr. 2.7 Konstrukce pellistoru [12]

Vně je umístěn topný meandr vyrobený z iridia, platiny nebo různých slitin platiny a kovů. Meandr současně slouží jako měřicí prvek, který je chráněn vrstvou oxidu thoria (ThO_2) nebo oxidem hlinitým (Al_2O_3). Povrch je tvořen oxidem thoria a katalyzátorem. Složení katalyzátoru závisí na detekci požadovaného plynu. Nejčastěji je však vyroben ze slitiny kovů a platiny. Funkcí katalyzátoru je snížení teploty, při které se měřený plyn vznítí. Plynná směs proniká skrz vrstvu slinutého kovu k citlivé části senzoru (pellistoru), která zabezpečuje ochranu před přímým ohněm. Při kontaktu měřeného plynu s kapslí pellistoru dochází na jeho povrchu ke katalytickému hoření a ohřevu kapsle. Tato reakce způsobí změnu odporu topného meandru. Teplotní změna kapsle je závislá na koncentraci měřeného plynu. Pro zvýšení

citlivosti a přesnosti měření se v praxi využívá Wheatstoneovo můstkové zapojení (Obr. 2.8). Pouzdro senzoru se doplní o další pellistor, který slouží jako referenční. Tento pellistor má povrchovou vrstvu bez katalyzátoru a nedochází na něm ke katalytickému hoření a změně odporu topného meandru. Při rozdílných odporech pellistorů dochází k rozvážení můstku a změně napětí. Pellistory nejsou vhodné do prostředí, kde se vyskytují tzv. katalytické jedy (sirovodík, fosforovodík aj.). Tyto jedy negativně působí na pellistor a může dojít k jeho zničení. [1], [11]



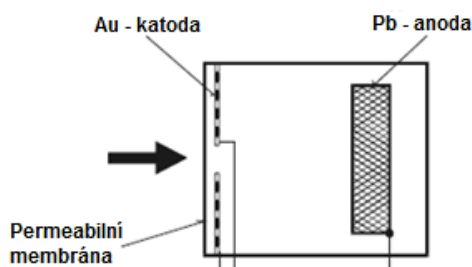
Obr. 2.8 Můstkové zapojení [12]

2.2.4 Elektrochemické senzory

Elektrochemické senzory jsou založeny na elektrochemických reakcích, které vznikají na určité elektrodě vložené do elektrolytu. Elektrolyt se vyskytuje ve dvou skupenstvích a to v kapalném a pevném. Kapalně elektrolyty jsou odděleny od analyzované plynné směsi pomocí membrán. Elektrolyt v kapalném stavu je obsažen v senzorech určených pro analýzu roztoků a plynů. Pevný elektrolyt se využívá v senzorech pro zkoumání plynů. Elektrochemická reakce probíhá na třech fázových rozhraních mezi analyzovaným plynem, kovovou elektrodou a elektrolytem v pevném skupenství. Na elektrodě dochází k přijímání nebo odevzdávání elektronů. Tato reakce lze ovlivnit vhodnou volbou materiálu, z kterého je elektroda vyrobena, volbou elektrolytu nebo elektrodového potenciálu. Mezi elektrodou a elektrolytem dochází ke vzniku elektrického potenciálu. Velikost potenciálu závisí na koncentraci iontů kovu v elektrolytu, z kterého je elektroda vyrobena. Je-li elektroda vyrobena z neušlechtilého kovu, kationty přechází do elektrolytu a na elektrodě vzniká kladný potenciál. Je-li elektroda vyrobena z ušlechtilého kovu, přechází část kationtů z elektrolytu na povrch elektrody a vzniká záporný potenciál. Elektrochemické senzory využívají k vyhodnocování vzniklého potenciálu potenciometrii (galvanometrii) nebo ampérometrii.

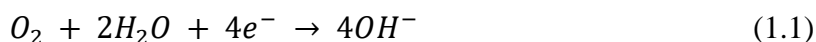
Potenciometrické (galvanometrické) senzory jsou založené na principu galvanického

článku. Sensory se skládají z dvou hlavních elektrod a jedné referenční elektrody. Referenční elektroda je určena pro stabilizaci potenciálu na pracovní elektrodě. Stabilizací potenciálu lze rozšířit lineární oblast měření. Pracovní elektroda je vyrobena ze zlata (Au) a tvoří katodu. Anoda je vyrobena z olova (Pb). Obě elektrody jsou ponořeny do kapalného elektrolytu. K oddělení elektrolytu od analyzovaného plynu se používá permeabilní membrána, která je propustná pouze pro plyny a pro vodu a ionty je nepropustná. Materiálem pro výrobu membrány se používá např. teflon, polypropylen nebo silikonový kaučuk. Princip galvanometrického senzoru lze nejlépe popsat na galvanometrickém senzoru kyslíku (Obr. 2.9).



Obr. 2.9 Konstrukce galvanometrického kyslíkového senzoru[12]

Molekuly kyslíku obsažené v plynné směsi prostupují membránou k pracovní elektrodě (katodě), kde dochází k elektrochemické reakci a molekuly kyslíku jsou redukovány.



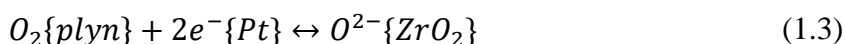
Na olověné anodě dochází k oxidaci materiálu a jeho spotřebě. Tuto reakci lze popsat rovnicí:



Proud procházející kyslíkovým článkem, odpovídá parciálnímu tlaku kyslíku v analyzované plynné směsi. Hodnoty proudu se pohybují v desítkách nA/ppm. Nevýhodou těchto senzorů je jejich životnost, kterou určuje olověná anoda. Délka životnosti galvanických senzorů se pohybuje od jednoho roku do tří let. Dále se tyto senzory využívají na měření oxidu uhelnatého (CO), sulfanu (H₂S), amoniaku (NH₃), freonů a dalších plynů. [10]

Potenciometrie s tuhým elektrolytem je využívána na snímání kyslíku v plynných směsích. Tato metoda využívá přenos jen jednoho druhu iontů (kationtů nebo aniontů) v tuhém elektrolytu. Senzor pro snímání kyslíku se skládá z topného drátu, z dvou elektrod a elektrolytu. Všechny komponenty jsou uloženy do pouzdra, které se skládá z měřicí

a srovnávací komory (Obr. 2.10). Elektrody jsou vyrobeny platiny (Pt) a jejich povrch je porézni. Elektrolyt pro senzory kyslíku je vytvořen z oxidu zirkoničitého (ZrO_2), který je dotován oxidem yttritým (Y_2O_3) nebo z oxidu titaničitého (TiO_2). Ten je vložen mezi platinové elektrody a je zahříván na teplotu mezi $650\text{ }^\circ\text{C}$ a $950\text{ }^\circ\text{C}$. Zahřátím elektrolytu nad $650\text{ }^\circ\text{C}$ klesá jeho odpor a tím je umožněn pohyb elektrických nábojů. Umístěním elektrolytu mezi elektrody vzniká mezi nimi elektrochemická reakce:



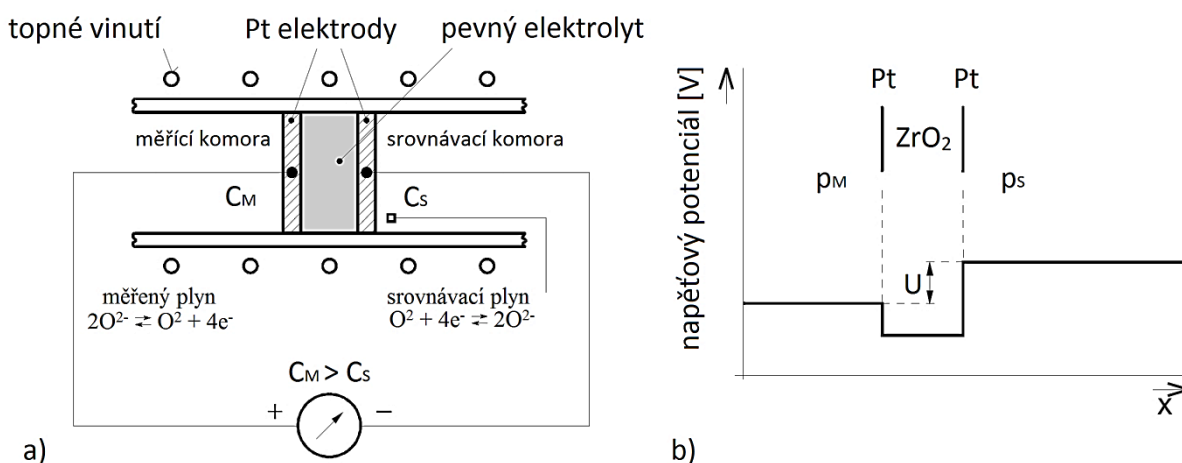
Na platinových elektrodách je napětí dáno rozdílem potenciálů získané z rovnice:

$$|U| = \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_M}{p_S} \quad (1.4)$$

kde p_M je parciální tlak kyslíku,

p_S parciální tlak kyslíku ve srovnávacím plynu (obvykle ve vzduchu).

Jsou-li parciální tlaky rovné, lze podíl tlaků p_M/p_S v rovnici (1.4) nahradit podílem koncentrací analyzovaného a srovnávacího plynu C_M/C_S .



Obr. 2.10 Potenciometrický Lambda senzor O2 na bázi ZrO2

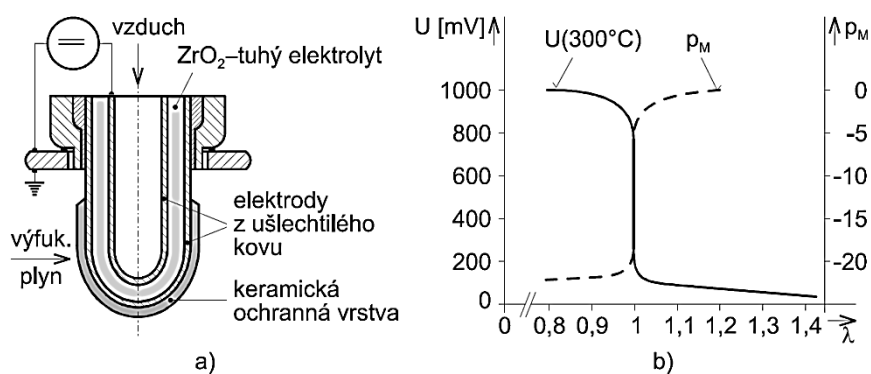
(a – konstrukce, b – potenciál na elektrodách) [1]

Tohoto principu detekce kyslíku v plynné směsi využívá tzv. Lambda senzor. Tento senzor lze nejčastěji nalézt ve strojích se spalovacím motorem, vybavených katalyzátorem výfukových plynů. Slouží k optimalizaci spalovacího procesu motoru, což má dopad na produkci škodlivých emisí ve spalinách. Lambda senzor je umístěn ve výfukovém potrubí, kde měří zbytkový kyslík ve spalinách. Zbytkový kyslík je porovnáván s referenčním kyslíkem, který je přiváděn do referenční komory z okolní atmosféry (Obr. 2.11). Lambda senzor s elektrolytem vyrobeným z oxidu titaničitého (TiO_2) nepotřebuje přívod srovnávacího

kyslíku. Řídicí jednotka motoru upravuje palivovou směs podle získaného poměru z lambda senzoru.

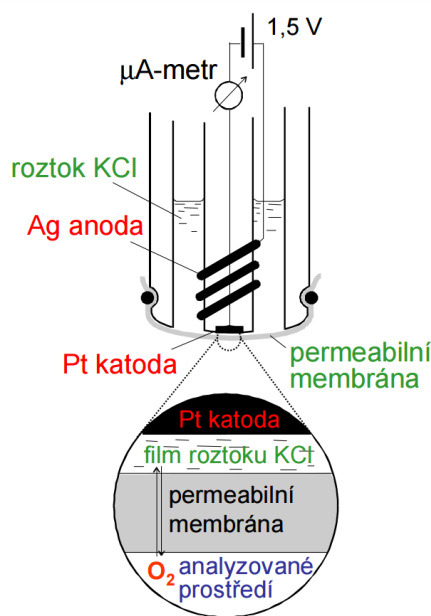
$$\lambda = \frac{V}{V_t} \quad (1.5)$$

kde V je objem kyslíku, který se přivádí do spalovacího procesu a V_t je objem kyslíku potřebný k dokonalému spálení směsi. Stechiometrický poměr pro správnou funkci katalyzátoru je $\lambda = 1$. Je-li $\lambda < 1$, objem kyslíku ve směsi je menší než u stochiometrického poměru a jedná se o tzv. bohatou směs. Je-li $\lambda > 1$, objem kyslíku ve směsi je větší než u stochiometrického poměru a jedná se o tzv. chudou směs. Nevýhodou lambda senzorů je malý rozsah měření objemu kyslíku. Proto jsou chudé směsi nepoužitelné a musí se využívat jiných senzorů např. ampérometrického kyslíkového senzoru (viz níže). [1], [12]



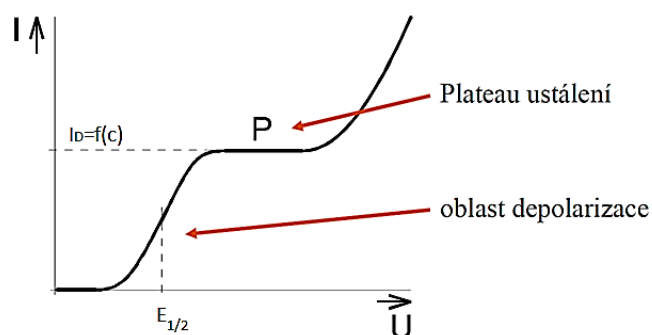
Obr. 2.11 Lambda senzor (a - konstrukce, b - závislost napětí naprázdno na λ) [1]

Ampérometrie se využívá pro analýzu roztoků a plynných směsí. Senzory obou typů využívají stejný princip. Liší se pouze v použití materiálů pro detekci požadovaného chemického prvku. Principem ampérometrických senzorů je měření procházejícího proudu mezi dvěma elektrodami, které jsou ponořeny do elektrolytu. Elektrolyt pro kyslíkový senzor je vyroben z chloridu draselného (KCl) nebo bromidu draselného (KBr), který je ve formě kapaliny nebo gelu. Senzor je složen z měřicí elektrody (katoda), která je polarizovatelná a k výrobě je využívána např. platina (Pt), zlato (Au) nebo jiné kovy, které lze polarizovat. Druhá elektroda je označována jako srovnávací (anoda) a nelze ji polarizovat. Nejčastěji je vyrobena z olova (Pb), stříbra (Ag), zinku (Zn) a jiných kovů. Elektrody jsou vloženy do roztoku elektrolytu. K udržení elektrolytu v senzoru se využívá membrána a skrze ni prochází analyzovaná látka (např. O₂), která zlepšuje selektivitu senzoru. Na elektrody je přiložen elektrický potenciál (Obr. 2.12).



Obr. 2.12 Clarkův senzor pro elektrochemickou analýzu kapalin a plynů [13]

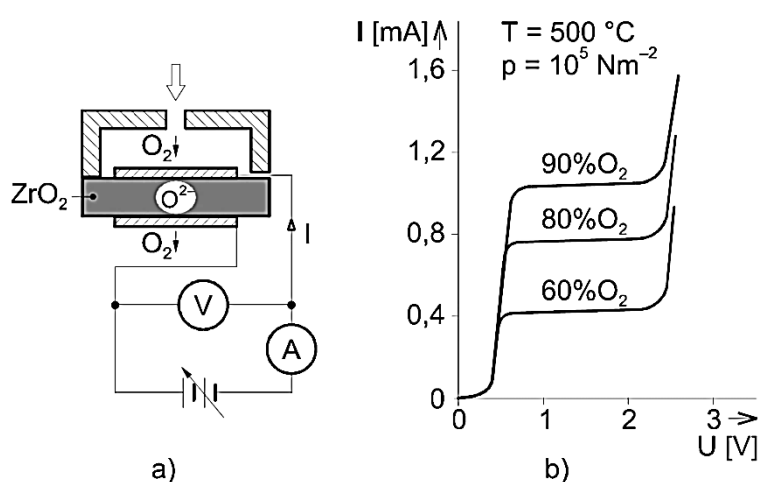
K elektrochemické reakci dochází na rozhraní mezi měřící elektrodou a roztoku, a tím dochází ke vzniku depolarizátoru. Při dostatečném napětí přivedeném na elektrody, dochází k překonání energetické bariéry mezi elektrodou a roztokem, a obvodem senzoru začne procházet proud. Pokud plynná směs neobsahuje analyzovaný prvek, v tomto případě kyslík (O_2), obvodem neprochází proud. Nárůst proudu se ustálí na hodnotě, která odpovídá koncentraci (c) analyzované látky. Tento proud je označován jako difuzní proud (I_D). Úsek s konstantním proudem I_D je označován jako „plateau“. Zde se všechny částice přivedené na povrch elektrody stačí přeměnit na depolarizátor a nedochází k nárůstu proudu (Obr. 2.13).



Obr. 2.13 Závislost $I = f(U, c)$ [13]

Ampérometrickými senzory lze detekovat kyslík (O_2), oxid siřičitý (SO_2), oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), plynný chlór (Cl_2), sulfan (H_2S) a jiné plyny. [13]

Existují také ampérometrické senzory s pevným elektrolytem. Nejpoužívanějším reprezentantem této skupiny senzorů je senzor kyslíku, který je opět složen ze dvou elektrod. Stále je potřeba napěťového zdroje pro napájení elektrod. Pevný elektrolyt je vyroben z tenké vrstvy oxidu zirkoničitého (ZrO_2), který je umístěn mezi obě elektrody (Obr. 2.14a). Analyzovaná plynná směs se přivádí do měřicí komory, kde je umístěna měřicí elektroda. Na elektrodě se obsažený kyslík (O_2) v plynné směsi přemění do iontové formy a vzniklé ionty procházejí skrze elektrolyt. Elektrochemickou reakcí vzniká difuzní proud, který se ustálí na hodnotě odpovídající koncentraci kyslíku v analyzované plynné směsi (Obr. 2.14b).



Obr. 2.14 Ampérometrická senzor kyslíku (a - konstrukce, b - závislost $I = f(U, c)$) [1]

Po průchodu iontů skrze elektrolyt se na referenční elektrodě chemickou reakcí transformují zpět na kyslík. Díky tomuto jevu je tento senzor označován jako „kyslíková pumpa“. Je-li teplota analyzované plynné směsi vyšší než $400\text{ }^\circ\text{C}$, není potřeba referenční elektrody a dochází ke zjednodušení senzoru. Výhodou tohoto senzoru je širší rozsah měření obsahu kyslíku oproti potenciometrickému lambda senzoru. Potenciometrický senzor má omezené použití pro chudé směsi, kde se lépe uplatní „kyslíková pumpa“. Ampérometrické senzory lze využít např. ve vodárenství, k ochraně životního prostředí, v biotechnologiích, v automobilovém průmyslu a jiných aplikacích. [10], [12]

2.3 Optické a optoelektronické senzory plynů

Optické a optoelektronické senzory pracují s elektromagnetickým zářením, které je ovlivňováno analyzovaným plynem. Senzory využívají záření pohybující se v ultrafialové, viditelné a infračervené oblasti spektra. Analyzovaný vzorek plynu ovlivňuje toto záření a může dojít k absorpci, lomu, rozptylu nebo změně polarizace. Fotometrická měření vychází z Lambert-Beerova zákona pro monochromatická záření. [10]

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-\varepsilon cl} \quad (1.6)$$

Kde: Φ – zářivý tok vystupující z látky

Φ_0 – zářivý tok vstupující do vrstvy látky

e – základ přirozeného logaritmu

ε – extinkční koeficient dané látky

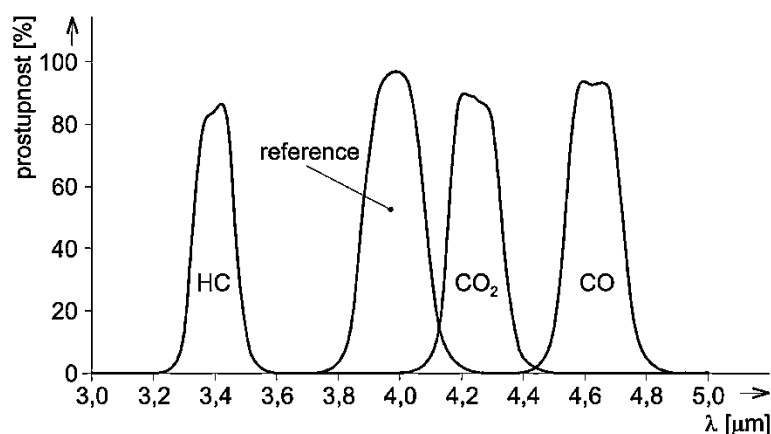
c – molární koeficient

l – tloušťka vrstvy

Požadované elektromagnetické záření lze vytvořit pomocí žárovky, výbojky či laserové diody. Dále je zpracováváno filtry, jejichž úkolem je upravovat záření vytvořené zdrojem. Využívány jsou úzkopásmové, monochromatické, plynové širokopásmové a interferenční filtry. Elektromagnetické záření po průchodu filtrem vstupuje do měřicí kyvety, kde je ovlivňováno analyzovaným plynem a po průchodu kyvetou záření dopadá na detektor. Jako detektor záření se využívá bolometrický senzor, pyroelektrický senzor, kondenzátorový mikrofon, fotoodpor, fotodiody aj. [1], [14]

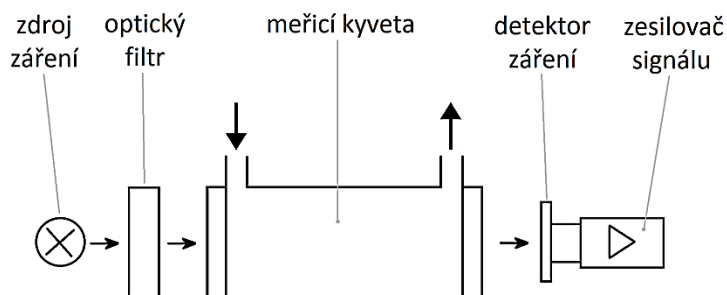
2.3.1 Infračervené analyzátoary plynu

Infračervené analyzátoary patří do skupiny bezdisperzních analyzátoarů, které pracují v širokém spektrálním pásu. Jsou nejrozšířenější kvůli své jednoduchosti, odolnosti a nižší ceně, na rozdíl od disperzních analyzátoarů pracujících v úzkém spektrálním pásu. Bezdisperzní analyzátoary nerozkládají světlo a pracují na principu absorpce infračerveného záření. Plyny složené minimálně ze dvou druhů atomů absorbují určité vlnové délky infračerveného záření a lze zobrazit jejich pohltivost v absorpčním spektru (*Obr. 2.15*). Prvky, které jsou souměrné (např. H₂, O₂, N₂ aj.) neabsorbují infračervené záření a nelze je zobrazit v absorpčním spektru.



Obr. 2.15 Absorpční spektrum některých plynů a charakteristika referenčního interferenčního filtru [12]

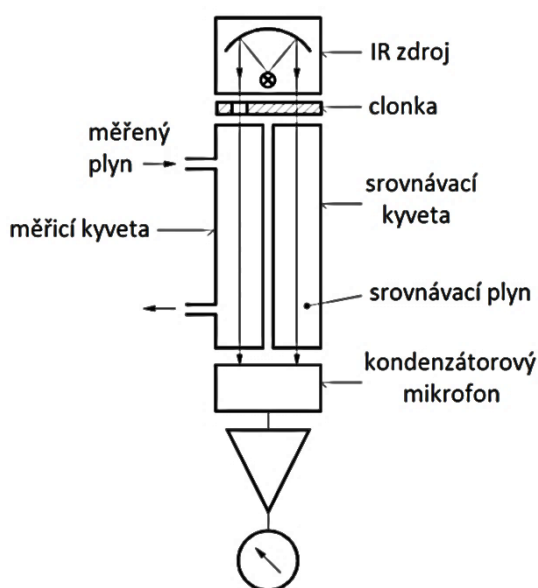
Pro nenáročné aplikace se používá jednopaprskový fotometr (Obr. 2.16). Tento analyzátor využívá jedné měřicí kyvety, do které se přivádí analyzovaný plyn. Generované záření prochází skrz optický filtr do měřicí kyvety a dopadá na detektor. Bezdisperzní analyzátoři používají neselektivní zdroje záření a požadované selektivity se dosahuje použitím selektivního detektoru.



Obr. 2.16 Jedno paprskový fotometr [12]

Nevýhodou jednopaprskového fotometru je přesnost, která je ovlivněna kolísáním intenzity záření a změnou citlivosti detektoru. Pro přesnější měření se používá dvou paprskový fotometr. Ten je složen ze zdroje záření, rotační clony, srovnávací kyvety, měřicí kyvety a kondenzátorového mikrofónu (Obr. 2.17). Zdroj produkuje infračervené záření, které proniká do kyvet skrz okénka, která jsou vyrobena z materiálů propouštějící infračervené záření, jako např. slídy, chloridu draselného (KCl), chloridu sodného (NaCl) a jiných materiálů. Do měřicí kyvety je přiváděn měřený plyn, který obsahuje látky absorbující záření. Každá absorbující látka pohlcuje jinou vlnovou délku záření. Srovnávací kyveta je naplněna

plynem, který nepohlcuje infračervené záření. Paprsky procházející oběma kyvetami a dopadají na detektor. Detektor je složen ze dvou komor, které jsou naplněny plynem a odděleny membránami tvořící kondenzátorový mikrofon. Absorpcí infračerveného záření detektorem, dochází k rozdílnému oteplování plynu v komorách. Zvýšení teploty vede ke změně tlaku, a tím i vychýlení membrány a změně kapacity. Rotační clona je určena k periodickému přerušování paprsku, což má za následek opakované oteplování a změnu tlaku v komorách detektoru. Na výstupu detektoru je měřena amplituda kmitů membrány, která odpovídá koncentraci měřené látky v plynné směsi. Použitím dvou kyvet dochází k minimalizaci chyby způsobené kolísáním intenzity.



Obr. 2.17 Dvou paprskový fotometr [12]

Disperzní analyzátoři jsou složité a využívají rozkladu světla. Fungují na principu absorpce monochromatického záření. K rozkladu světla využívají hranol, mřížky a interferenční filtry. Jejich uplatnění je v laboratořích kvůli mechanické odolnosti. [10], [14]

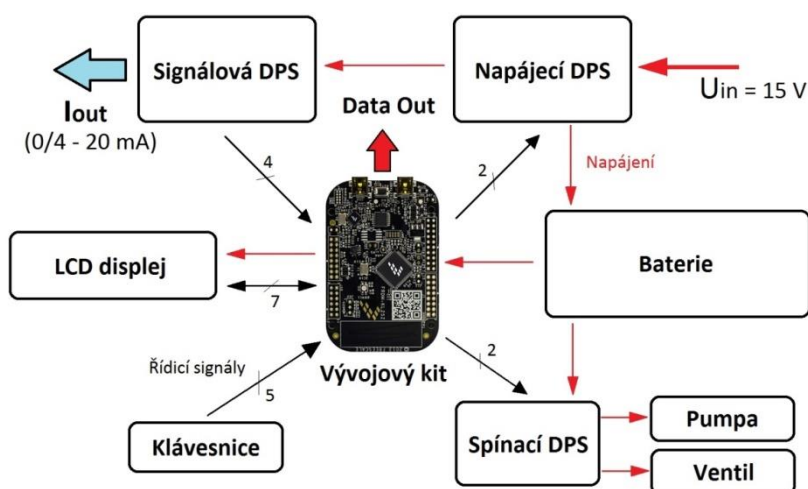
2.3.2 Ultrafialové analyzátoři plynu

Ultrafialové analyzátoři pracují s ultrafialovým zářením a k jeho generaci je zapotřebí výbojky. Nejčastěji se využívá rtuťová výbojka. Součástmi analyzátoru jsou filtry, kyvety a detektor. Jako detektor lze použít polovodičovou fotodiodu, vakuovou fotonku nebo plynnou fotonku. Ultrafialové analyzátoři se využívají pro měření koncentrace ozonu (O_3), oxidů dusíku (NO_x), oxidu siřičitého (SO_2), amoniaku (NH_3), par acetonu, benzenu, toluenu

a jiných organických látek. [10]

3 Návrh analyzátoru plynu

Analyzátor plynu je zařízení, které se využívá k analýze plynných směsí (např. vzduchu). Tato zařízení lze nalézt ve strojním průmyslu, potravinářství, lékařství, v ochraně životního prostředí a jiných odvětvích. Tato část práce se zabývá návrhem elektronického systému sloužící k rozboru plynných směsí. Jedná se o univerzální zařízení s mikrokontrolérem, které lze doplnit až čtyřmi senzory plynů. Navrhovaný systém je kompatibilní se senzory s napěťovým, nízkonapěťovým a proudovým výstupním signálem. Dostupné napěťové plynné senzory pracují s výstupním napětím 0 – 10 V a proudové senzory využívají rozsah výstupního proudu 0 – 20 mA. Jako nízko napěťový plynný senzor lze použít bateriový kyslíkový článek. Tyto kyslíkové články pracují v rozsahu jednotek mV. Výstupní napětí je závislé na stáří a opotřebení článku a musí se provádět úprava signálu před zpracováním. Signály vystupující ze senzorů je potřeba upravit do určité napěťové úrovně, které je mikrokontrolér schopen zpracovat.



Obr. 3.1 Blokové schéma zapojení analyzátoru plynu

3.1 Konstrukce a komponenty

Celé zařízení se skládá z různých komponentů, kterými se tato práce bude zabývat níže. Všechny komponenty jsou uloženy do odolného hliníkového boxu. Tento box je vyroben z kvalitního hliníku, který je velmi pevný a odolá případným nárazům. Zařízení je určeno k přenosu mezi stanovišti, na kterých je možné provádět měření. Proto se navrhované zařízení

se může dostat do nepříznivých okolních podmínek. Pro lepší pozorovací úhel je box vybaven polohovacími předními nožičkami. Rozměry boxu jsou 85 mm x 285 mm x 240 mm.

V čelním panelu je vytvořený otvor pro display, vypínač, signalizační LED diodu a konektor klávesnice. Vně boxu jsou umístěny určité senzory, vývojový kit, deska plošného spoje napájení, deska plošného spoje pro úpravu výstupních signálů senzorů, akumulátor, plynová pumpa a dvoucestný ventil.

3.1.1 Zdroj energie

Pro funkci navrhovaného analyzátoru je zapotřebí zdroj energie. K napájení celého zařízení je použit externí napěťový zdroj. Jedná se o spínaný zdroj napětí, určený k zapojení do standardní sítě s jmenovitým napětím 230 V a s frekvencí 50 Hz. Spínaný zdroj je od výrobce Mean Well s označením GTS18E15-P1J. Tento zdroj transformuje napětí sítě na stejnosměrné napětí. Výstupní napětí dosahuje 15 V s maximálním výstupním proudem 1,2 A. Tento externí zásuvkový zdroj obsahuje ochranu proti přetížení a přepětí. Výrobce udává účinnost 87 %.

Pro možnost analýzy plyných směsí mimo dosah elektrické sítě, je analyzátor vybaven olovo-kyselinovým 12V akumulátorem. Vybraný akumulátor je od výrobce NERBO (Obr. 3.2). Jedná se o bezúdržbový akumulátor s kapacitou $C_{20} = 2,2\text{Ah}$ tzn., že akumulátor je schopen dodávat po dobu dvaceti hodin do zátěže proud $I = 0,11\text{ A}$. Z hodnoty zatěžovacího proudu lze usoudit, že navrhovaný systém není na dlouhodobou činnost při napájení akumulátorem. Za nejvíce energeticky náročný prvek lze označit pumpu, které je použita pro čerpání plyné směsi k senzorům. Je-li plyn přiváděn pod tlakem již do analyzátoru, lze pumpu vypnout a tím snížit spotřebu energie. Další, ne však zásadního snížení spotřeby lze dosáhnout vypnutím podsvícení displeje. Naopak není možné ovlivnit spotřebu senzorů, jelikož pro svoji funkci potřebují stanovenou energii, tudíž ji nelze snížit.

Olovo-kyselinový akumulátor byl zvolen pro svou bezúdržbovost a snadné nabíjení. Při cyklickém nabíjení je možné použít napětí 14,4 – 15 V. Akumulátor je v analyzátoru neustále připojen, proto musí napájecí napětí dosahovat „Standby“ nabíjecího napětí akumulátoru. Toto napětí je v rozmezí mezi 13,4 V a 13,8 V. Této hodnoty dosáhneme úpravou vstupního napájecího napětí dodávaného externím zdrojem. Ke snížení napětí z 15 V jsou použity dvě diody, které svým úbytkem sníží napětí na požadované nabíjecí „Standby“ napětí. Při tomto napětí lze akumulátor ponechat trvale připojený bez rizika jeho poškození. Snížení napětí je zajištěno na *napájecí* DPS, ke které je akumulátor připojen.



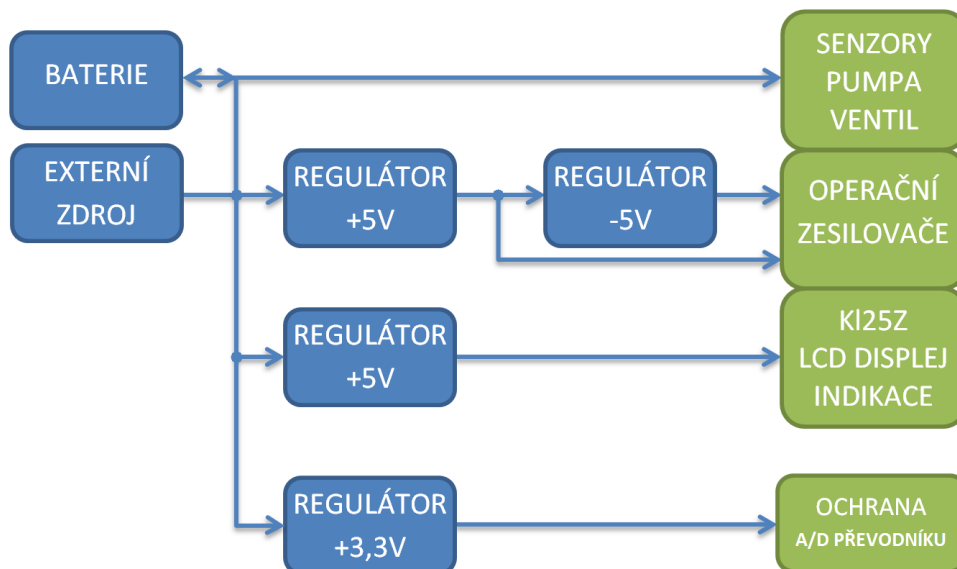
Obr. 3.2 Olovo-kyselinový akumulátor [17]

3.1.2 Napájecí, signálová a spínací deska plošného spoje (DPS)

K vytvoření funkčního celku, bylo nutné navrhnout napájecí a signálovou desku plošného spoje. Pro návrh obou DPS by použit návrhový software EAGLE od společnosti CADSoft. Tento software je volně šiřitelný, mohou však být použity jen dvě vrstvy DPS s omezenou velikostí. Pro návrh analyzátoru je tento software vyhovující. Pokud by byla potřeba větších návrhů, bylo by nutné zakoupit licenci. Obě DPS jsou kombinací vývodových součástek a součástek určených pro povrchovou montáž. Při návrhu bylo dbáno na velikost výsledných DPS, proto návrh probíhal ve dvou vrstvách. Po dokončení návrhu byli DPS vyrobeny společností PragoBoard s.r.o.. Desky jsou vyrobeny z cuprexitu (tloušťka mědi 18 μm , materiál FR4, tloušťka substrátu 1,5 mm), na něž byla nanесena nepájevá maska sloužící k ochraně vodivých cest. Motivy desek plošných spojů a osazovací výkresy jsou obsaženy v **přílohách C a D**.

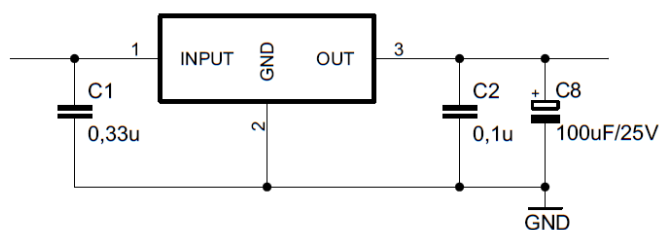
3.1.2.1 Napájecí DPS

Napájecí DPS byla navržena pro potřebu různých napájecích napětí. Pro funkci celého zařízení jsou nutná čtyři různá napětí a to +5 V, -5 V, + 3,3 V a napětí akumulátoru. Pro vytvoření napětí +5 V a +3,3 V jsou použity lineární stabilizátory v provedení pro povrchovou montáž (Obr. 3.3).



Obr. 3.3 Blokové schéma napájecí DPS

Tyto stabilizátory poskytují maximální výstupní proud 0,5 A. V obou těchto integrovaných obvodech se nachází omezení výstupního proudu. Přesáhne-li teplota 125 °C vlivem vysokého odběru proudu, zareaguje tepelná ochrana a stabilizátor omezí výstupní proud. Stabilizátory se dotýkají DPS velkou částí svého povrchu. Pro dobrá chlazení byly vytvořené na DPS dosedací chladičí plošky. Tyto plošky jsou spojeny s druhou stranou DPS pomocí pokovených otvorů, a tím zajišťují lepší odvod tepla. Každý stabilizátor je v návrhu doplněn dvěma keramickými kondenzátory podle předepsaného zapojení a jedním elektrolytickým kondenzátorem (Obr. 3.4).

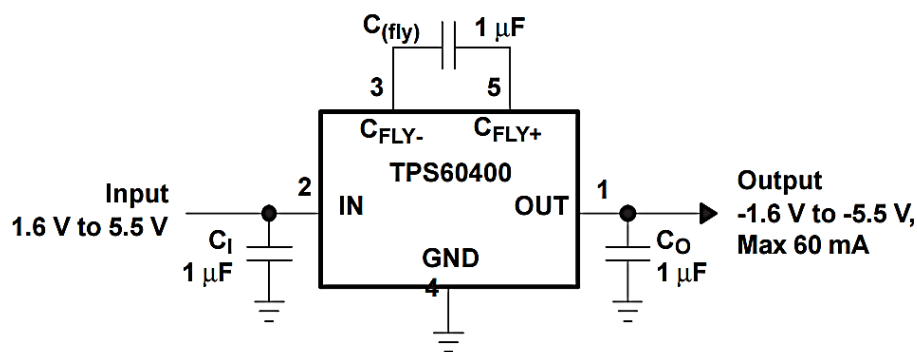


Obr. 3.4 Zapojení stabilizátoru

V návrhu jsou použité dva lineární stabilizátory tvořící napětí +5 V. První stabilizátor vytváří napětí +5 V, které je využito pro napájení vývojového kitu FRDM-KL25Z a obvodů umístěných na signálové DPS. Druhý stabilizátor je určen pro napájení displeje, sirénky a signalizační LED diody. Varovná sirénka je umístěna přímo na DPS a tvoří zvukovou

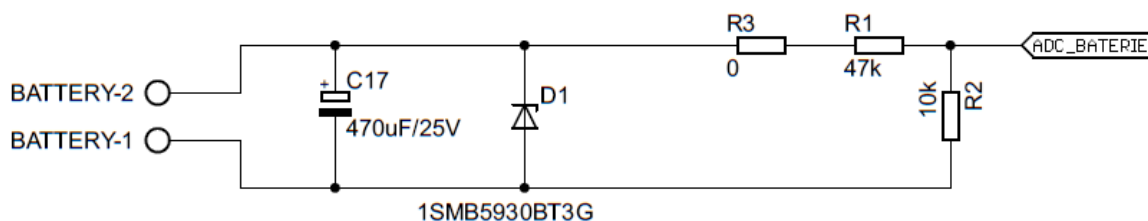
signalizaci nízkého napětí baterie. Zvukový podnět je doplněn signalizační LED diodou, která je umístěna na předním panelu analyzátoru. Napětí +3,3 V, vytvořené stabilizátorem LF33CDT od firmy ST Microelectronics, je použité pro ochranu vstupů A/D převodníku. Ochrana je umístěna na signálové DPS.

K vytvoření napětí -5 V byla použita invertující nábojová pumpa TPS604003 od společnosti Texas Instrument. Tato součástka invertuje kladné napětí přivedené na vstup na záporné napětí stejné hodnoty. Tato nábojová pumpa pracuje v rozsahu vstupního napětí 1,6 - 5,5 V, které invertuje na výstup. Napětí +5 V je přivedeno z výstupu z jednoho lineárního regulátoru upravující napájecí napětí. Nábojová pumpa je určena pro napájení zesilovačů, které jsou umístěné na signálové DPS. Ke své funkci využívá pouze tři keramické kondenzátory s hodnotou 1 μF (Obr. 3.5). Maximální výstupní proud dosahuje 60 mA, který je dostačující pro napájení operačních zesilovačů.



Obr. 3.5 Zapojení nábojové pumpy[26]

Dále se na *napájecí* DPS nachází snímání napětí baterie. K tomuto účelu slouží jednoduchý odporový dělič, který je tvořen třemi odpory (Obr. 3.6).



Obr. 3.6 Snímání napětí baterie

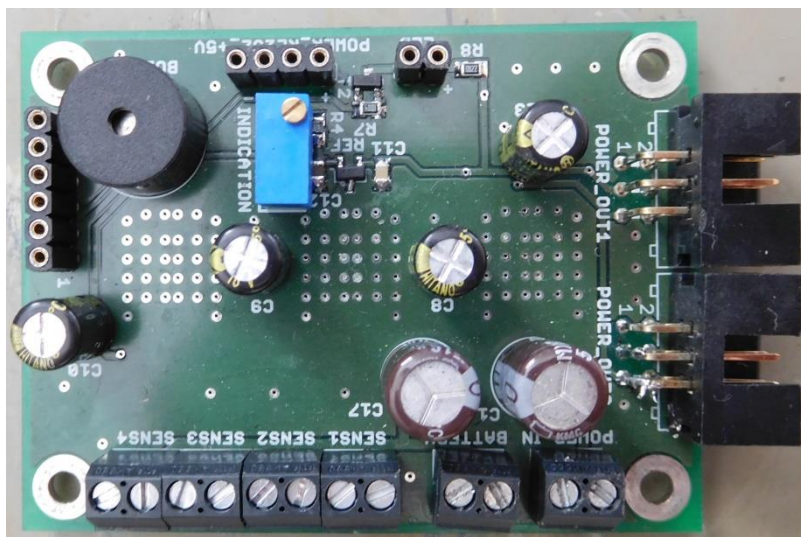
Odporový dělič je vypočítán ze vztahu

$$U_{bat} = U_{nab} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (1.7)$$

Do tohoto vztahu jsou dosazené známé hodnoty. Napětí baterie U_{bat} je dáno maximálním napětím, které je možné připojit na A/D převodník. Toto napětí je získáno z katalogového listu vývojového kitu. Vývojový kit využívá 16 bitový A/D převodník a maximální vstupní napětí je rovno 3 V. Tato maximální hodnota je v šestnáctkové soustavě rovna 0xFFFF. Další známá hodnota je nabíjecí napětí U_{nab} . Toto napětí je vytvořeno z napájecího napětí, které je sníženo o úbytky na snižovacích diodách. Pro přesný výpočet bylo napětí změřeno v laboratoři a je rovno $U_{nab} = 13,4$ V. Pro usnadnění výpočtu byla zvolena hodnota odporu $R_2 = 10$ k Ω . V rovnici poté zbyla neznámá hodnota R_1 a R_3 . Byly použity dva odpory kvůli přesnému nastavení odporu a lze je v rovnici (1.7) nahradit jedním odporem R_x . Matematickými operacemi vyjádříme hodnotu neznámého odporu R_x .

$$U_{bat} = U_{nab} \cdot \frac{R_2}{R_x + R_2} \quad (1.8)$$

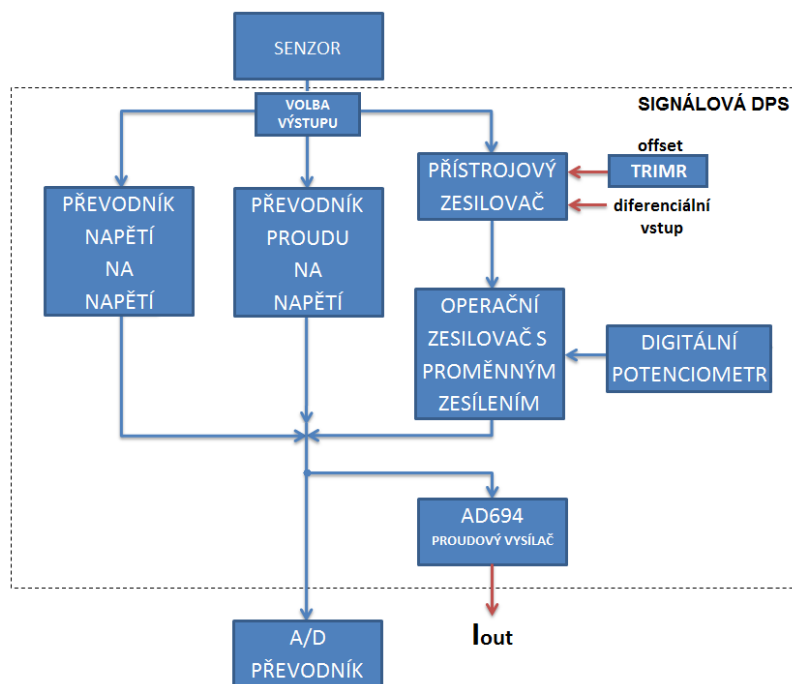
S ohledem na možnost nabíjení baterie 15 V, bylo napětí U_{bat} sníženo na 2,5 V. Z rovnice (1.8) vychází hodnota R_x 43,6 k Ω . S ohledem na výrobní řadu odporů byl zvolen odpor s hodnotou 47 k Ω . Jelikož je celé zařízení napájené externím zdrojem, který má pevnou hodnotu napětí, není potřeba aktivní elektronické ochrany proti přepětí. K ochraně celého zařízení jsou použity dvě Zenerovy diody s kombinací dvou tavných pojistek. Diody jsou umístěny u konektorů určených pro připojení externího zdroje napájení a baterie. Tavné pojistky jsou umístěny v zadním panelu boxu. K přetavení pojistek dochází při průchodu proudu nad 1 A. Hodnota proudu je dostačující pro nabíjení baterie a provoz celého zařízení. Proti přepólování je použit souosý konektor. Celé schéma *napájecí* DPS, předloha pro osvit a osazovací výkres jsou obsaženy v **příloze A a B**.



Obr. 3.7 Napájecí DPS

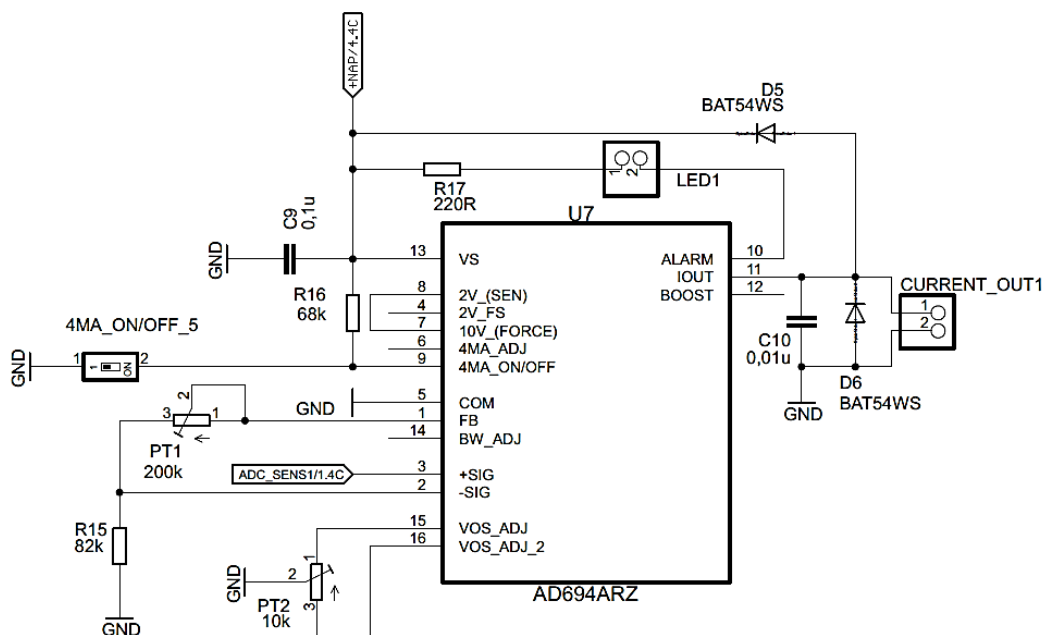
3.1.2.2 Signálová DPS

Tato DPS byla navržena za účelem úpravy výstupních signálů ze senzorů. K navrhovanému analyzátoru plynů je možné připojit až čtyři senzory. Kvůli prostorovému uspořádání v boxu zařízení, jsou na signálové desce vždy upravovány signály ze dvou senzorů. Tudíž, pro zpracování signálů ze čtyř senzorů je nutné použít dvě *signálové* DPS. Obě desky jsou umístěny nad sebou a tím je možné lépe využít zástavbového místa v boxu zařízení. Navrhovaný analyzátor plynů je určený pro tři typy senzorů, a to napěťovým (0 – 10 V), proudovým (0 – 20 mA) a nízkonapěťovým (jednotky mV) výstupním signálem. Na *signálové* DPS jsou dva kanály a ke každému kanálu je možné připojit jeden senzor s napěťovým, proudovým nebo nízkonapěťovým výstupním signálem (*Obr. 3.8*).



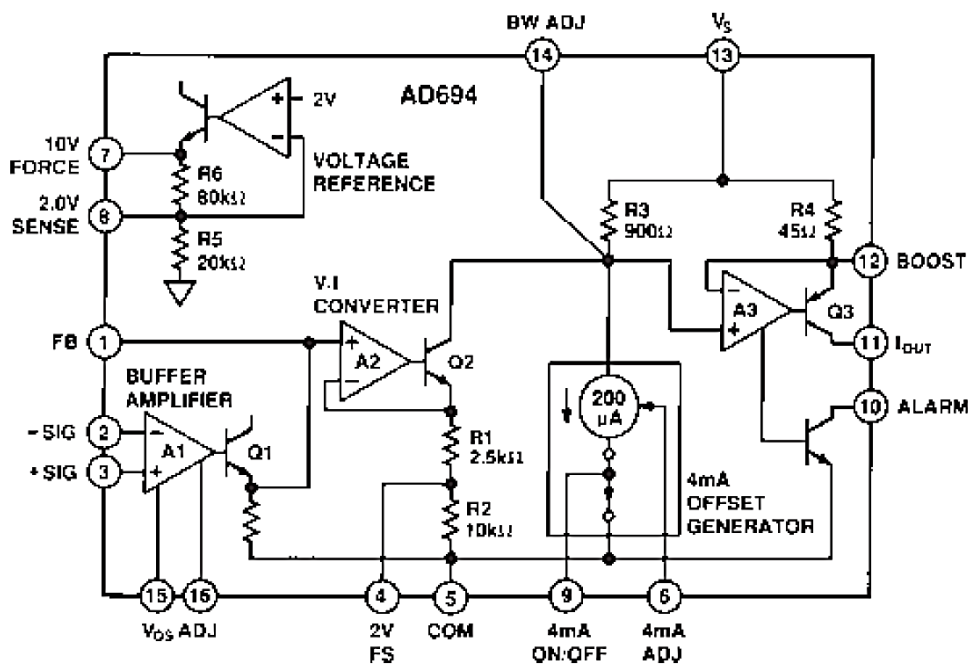
Obr. 3.8 Blokové schéma jednoho kanálu

Výstupní signály ze senzorů jsou snímány pomocí A/D převodníku, který je součástí vývojového kitu. Analogově-digitální převodník je schopen převádět v rozsahu 0 – 3 V analogové napětí na šestnácti bitovou hodnotu. To znamená, že je nutné výstupní signály ze senzorů převést do tohoto rozsahu. Tento rozsah analogového napětí byl snižen na 0 – 2 V. Snižování rozsahu zapříčinilo použití proudového vysílače AD694ARZ od společnosti Analog Devices. Tento obvod je použit pro převod napěťového signálu, který je určen pro zpracování A/D převodníkem, na proudový signál. Proudový signál je vyveden na konektor umístěný na zadním panelu boxu. Na pin 9 proudového vysílače je připojen vypínač, který umožňuje volbu výstupního proudového rozsahu (Obr. 3.9).



Obr. 3.9 Proudový vysílač AD694ARZ

Je-li spínač v poloze ON, proudový signál dosahuje hodnoty 4 – 20 mA, v opačném případě 0 – 20 mA. Proudový signál lze dále zpracovávat externím zařízením. Proudový vysílač je schopen pracovat s vstupním napětím až 10 V, ale k transformaci napětí této hodnoty však potřebuje referenční zdroj napětí, který je jeho součástí. Deseti voltový referenční zdroj napětí je funkční při minimálním napájecím napětí 12,5 V. Tento požadavek je možné zajistit pouze po připojení analyzátoru k externímu napájecímu zdroji. Při odpojení napájecího zdroje a provozu na akumulátor, dochází k postupnému poklesu napětí pod 12,5 V a proudový vysílač není dostatečně napájen. Při malé obměně zapojení lze proudový vysílač napájet 4,5V napětím. Tato hodnota napájecího napětí bude vždy splněna, jak při napájení zařízení z akumulátoru tak i z externího zdroje. Proudový vysílač v tomto případě využívá 2V referenční zdroj napětí, který je také jeho součástí. Snížení napájecího napětí proudového vysílače způsobí snížení rozsahu vstupního napětí. Toto napětí je porovnáváno s 2V referenčním zdrojem napětí a na základě výsledku je generován proudový signál.

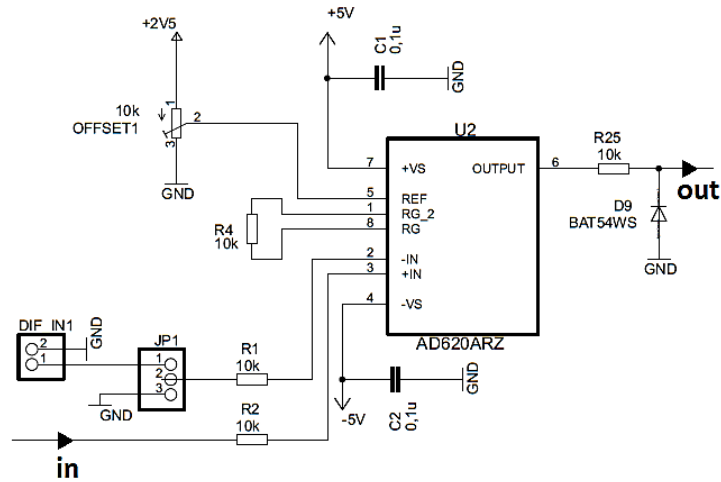


Obr. 3.10 Funkční blokové schéma [18]

Pro každý typ výstupního signálu senzoru je používána jiná část kanálu. Volbu obvodu, kterým bude signál zpracován, zajišťují dva třicestné DIP spínače. Na obou spínačích musí být vždy stejné kombinace a může být sepnuta pouze jedna cesta. První cesta, označená jedničkou na spínači, je určena pro zpracovávání nízkonapětového signálu. Při sepnutí do polohy ON, je signál přiváděn na přístrojový zesilovač od společnosti Analog Devices s označením AD620ARZ. Přístrojový zesilovač je symetricky napájen a je možné na jeho vstup přivádět diferenční signál. Zesílení bylo vypočteno z rovnice (1.9) získané z katalogového listu.

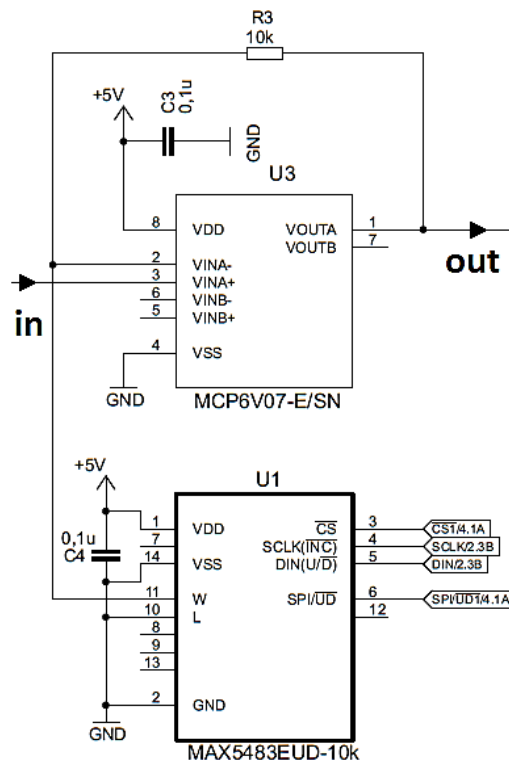
$$G = \frac{49,4k\Omega}{R_G} + 1 \quad (1.9)$$

Odpor R_G je připojen mezi vývody 1 a 8 (Obr. 3.11). Pomocí trimru, který je připojen k vývodu 5, je možné upravovat vstupní offset.



Obr. 3.11 Přístrojový zesilovač

Přístrojový zesilovač plní funkci předzesilovače signálu vystupujícího ze senzoru pro druhý zesilovací stupeň, tvořený operačním zesilovačem. Za přístrojovým zesilovačem je připojen operační zesilovač v neinvertujícím zapojení (Obr. 3.12). Tento zesilovač tvoří koncové zesílení a nastavuje hodnotu napětí do požadovaných mezí.



Obr. 3.12 Operační zesilovač v neinvertujícím zapojení

Pro možnost změny zesílení byl použit digitální potenciometr od společnosti Maxim Integrated Products s označením MAX5483EUD. Společně s odporem R_3 vytváří proměnné zesílení, které lze vypočítat z rovnice (1.10).

$$A_u = \frac{U_{out}}{U_{in}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.10)$$

Hodnota R_2 je dána hodnotou odporu R_3 v zapojení na obr 3.12. Digitální potenciometr je schopen měnit svůj odpor v 1024 krocích. Při maximálním počtu kroků dosahuje hodnoty 10 k Ω a při nulovém počtu kroků dosahuje hodnota odporu 70 Ω . Dosazením hodnot do rovnice (1.10) lze vypočítat maximální zesílení. Maximální napěťové zesílení při nejnižší možné hodnotě odporu digitálního potenciometru dosahuje hodnoty 143. Nejmenší napěťové zesílení, které lze teoreticky vytvořit je rovno 2. Ovládání digitálního potenciometru zajišťuje mikrokontrolér, který je umístěn na vývojovém kitu. Ke komunikaci mezi mikrokontrolérem a digitálním potenciometrem lze použít sériové periferní rozhraní (SPI) nebo UP/DOWN rozhraní.

Sériové periferní rozhraní využívá třívodičovou sběrnici, která slouží pouze k zápisu. Digitální potenciometr využívá jen tři vstupní signály: chip select (CS), data in (DIN(U/D)) a data clock (SCLK(INC)). Pro používání SPI komunikace je nutné na vývod 6 (SPI/UD) přivést logickou jedničku. Pomocí signálu CS je povolena komunikace mezi mikrokontrolérem a digitálním potenciometrem. Při zapisování dat do posuvného registru se udržuje řídicí signál CS v logické nule. Při každé náběžné hraně signálu SCLK jsou synchronně data načtena do posuvného registru. Pro přenos příkazů a dat je potřeba 24 hodinových cyklů. Po načtení dat do posuvného registru je signál CS nastaven do logické jedničky a digitální potenciometr přestane zapisovat data do posuvného registru. Data v posuvném registru jsou poté dekodována podle tabulky (Tab. 2).

Tab. 2 Dekódovací tabulka [19]

CLOCK EDGE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	...	24
Bit Name	—	—	C1	C0	—	—	—	—	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	—	...	—
Write Wiper Register	0	0	0	0	0	0	0	0	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	X	...	X
Copy Wiper Register to NV Register	0	0	1	0	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	...	—
Copy NV Register to Wiper Register	0	0	1	1	0	0	0	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	...	—

*D9 is the MSB and D0 is the LSB.
X = Don't care.

Komunikační rozhraní UP/DOWN také využívá třívodičové sběrnice. Tato komunikace je jednodušší. Pro použití tohoto rozhraní je nutné na vývod 6 (SPI/UD) přivést logickou nulu. Tím je zajištěna volba komunikace, jaká bude používána. Opět jsou využity signály chip select (CS), data in (DIN(U/D)) a data clock (SCLK). Signál CS povoluje funkci digitálního potenciometru, je-li v logické nule. Na vývod 4 (SCLK(INC)) digitálního potenciometru je přiváděn hodinový signál. Je-li potenciometr v aktivním stavu (CS=0), tak při doběžné hraně hodinového signálu SCLK je zvyšována/snižována hodnota odporu. Má-li být hodnota odporu zvyšována nebo snižována určuje signál DIN(U/D). Jestliže se tento signál nachází v logické jedničce, tak je hodnota odporu zvyšována v opačném případě je snižována (Tab. 3). Digitální potenciometr je schopen udržet svoji hodnotu při ukončení komunikace. Hodnota poslední změny hodnoty odporu je uložena do registru. Pro řízení digitálních potenciometrů v této práci, bylo zvoleno komunikační rozhraní UP/DOWN.

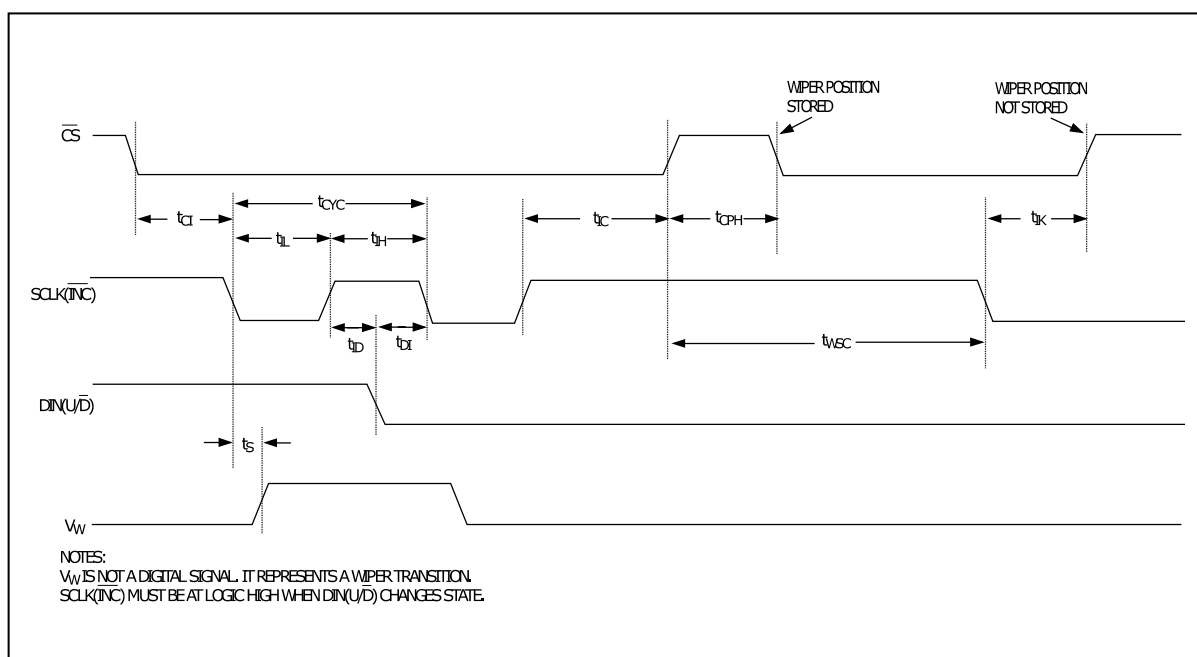
Tab. 3 Komunikační rozhraní UP/DOWN [19]

CS	DIN(U/D)	SCLK(INC)	W
L	L	↓	Decrement
L	H	↓	Increment
L	X	↑	No Change
H	X	X	No Change
↓	X	X	No Change
↑	X	L	Position Not Stored
↑	X	H	Position Stored

↑ = High-to-low transition.

↓ = Low-to-high transition.

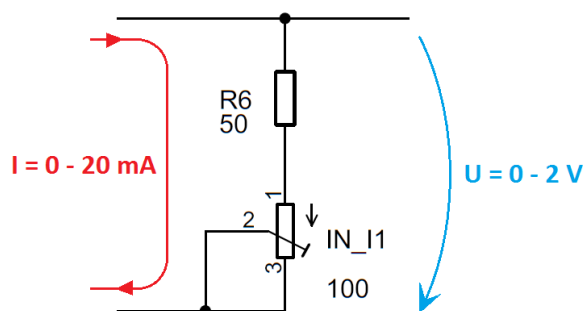
X = Don't care.



Obr. 3.13 Komunikace UP/DOWN[19]

Nízko napěťový signál používá např. kyslíkový bateriový článek. Hodnota výstupního signálu je závislá na jeho častém používání, stáří, teplotě a tlaku. Výstupní signál může dosahovat jiné hodnoty při vystavení článku stejné koncentraci plynu. Proto je nutná častější kalibrace. Ta je zajištěna proměnným napěťovým zesílením, které zajišťuje správné nastavení úrovně napětí při změně tlaku, teploty či při zvýšeném opotřebení.

Druhá cesta, označena dvojkou na spínači, je určena pro zpracovávání proudového signálu vystupujícího ze senzoru. Pro napěťový signál je jednoduchý snímací obvod vytvořen s pevného odporu a trimru, zapojených do série (Obr. 3.14).



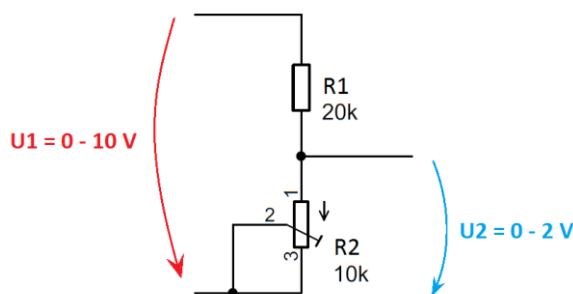
Obr. 3.14 Převod proudu na napětí

Maximální hodnota proudového signálu (20 mA) musí po převodu odpovídat 2 V. Hodnotu potřebného odporu lze vypočítat dle následující rovnice, vyplívající z Ohmova zákona (1.11).

$$R = \frac{U}{I} = \frac{2}{0,02} = 100 \Omega \quad (1.11)$$

Pro přesné nastavení napětí je využit víceotáčkový trimr. Pro zamezení vniku chyb do měření je nutné provést kalibraci před připojením senzoru. Po přivedení kalibračního proudu, jehož hodnota je 20 mA, je pomocí trimru nastavena na výstupu *signálové* DPS hodnota napětí 2 V.

Třetí cesta, označena trojkou na spínači, je určena pro zpracovávání napěťového signálu vystupujícího ze senzoru. Výstupní napěťový signál se pohybuje v rozmezí 0 V až 10 V. Opět je potřeba signál upravit, aby ho bylo možné snímat A/D převodníkem. Ke snížení napětí je použit jednoduchý napěťový dělič (Obr. 3.15).



Obr. 3.15 Dělič napětí

Hodnota odporů byla vypočítána dle následující rovnice (1.11).

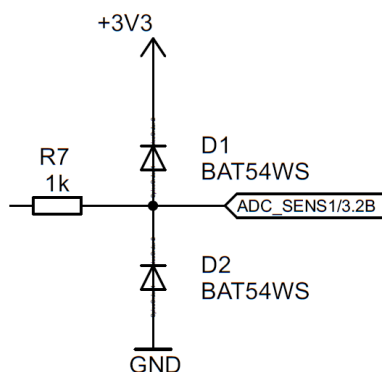
$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (1.11)$$

Do této rovnice bylo dosazeno známé vstupní napětí, které je dáno výstupním napětím senzoru ($U_1 = 10 \text{ V}$). Při maximální hodnotě vstupního napětí je požadováno výstupní napětí $U_2 = 2 \text{ V}$. Hodnota odporu $R_1 = 20 \text{ k}\Omega$ byla zvolena. Poté lze rovnici (1.11) upravit a vyjádřit hodnotu odporu R_2 .

$$R_2 = \frac{U_2 R_1}{U_1 - U_2} = \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^3}{10 - 2} = 5 \cdot 10^3 \Omega \quad (1.12)$$

Výsledná hodnota R_2 odpovídá poloviční hodnotě použitého trimru ($10 \text{ k}\Omega$). Tím je umožněno přesné nastavení požadovaného výstupního napětí. Opět je nutné před připojením senzoru nakalibrovat rozsah, jako u převodu proudového signálu na napětí. Připojením kalibračního napětí (10 V) se pomocí víceotáčkového trimru nastaví přesná hodnota napětí (2 V) vystupujícího z napěťového děliče.

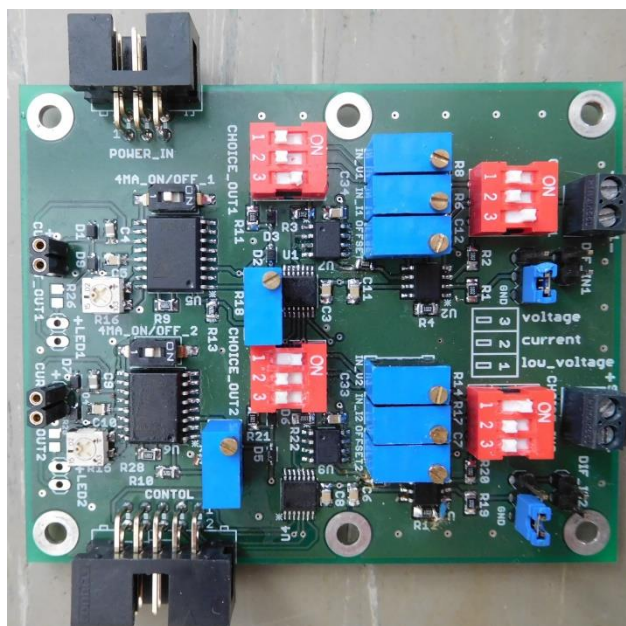
Při chybném nastavení mezí nebo připojení vyššího napětí je pravděpodobné, že se vyskytne na výstupu děliče vyšší napětí než $3,6 \text{ V}$. Napětí vyšší než $3,6 \text{ V}$ je nebezpečné pro A/D převodník a mohlo by vést k jeho destrukci. K ochraně A/D převodníku se využívá omezovač napětí, který je tvořen dvěma Schottkyho diodami s malým úbytkem napětí. Diody jsou zapojené na výstupu ze signálové DPS. Horní dioda je katodou připojena na napětí $+3,3 \text{ V}$, které je přivedeno z napájecí DPS. Spodní dioda je připojena anodou na zem (Obr. 3.16).



Obr. 3.16 Omezovač napětí

Při výskytu záporného napětí na výstupu, které lze přivést pouze špatným zapojením senzorů, je otevřena spodní dioda $D3$ a toto napětí je uzemněné. Jenže dioda má svůj vlastní úbytek napětí (0,5 V), takže z např. -5 V se na zem dostane pouze -4,5 V a na výstupu zůstane -0,5 V. Pokud je na výstup přiváděno napětí vyšší než napětí +3,3 V, na které je připojena katoda horní diody $D2$, tak se dioda otevře a omezí napětí. Je-li hodnota napětí např. +5 V, tak se omezí na hodnotu +3,8 V. Tato hodnota je určena napájecím napětím (+3,3 V) a úbytkem napětí (0,5 V) na diodě $D2$. Je-li přiváděno napětí v rozsahu 0 V až +3,3 V, diody zůstanou zavřené a nedochází k žádnému napěťovému omezení. Napětí vyšší než +3,3 V lze přivést pouze při špatném zapojení senzorů k *signálové DPS*.

Celé navržené schéma zapojení signálové DPS, motivy a osazovací výkresy jsou obsažené v přílohách C a D.



Obr. 3.17 Signálová DPS

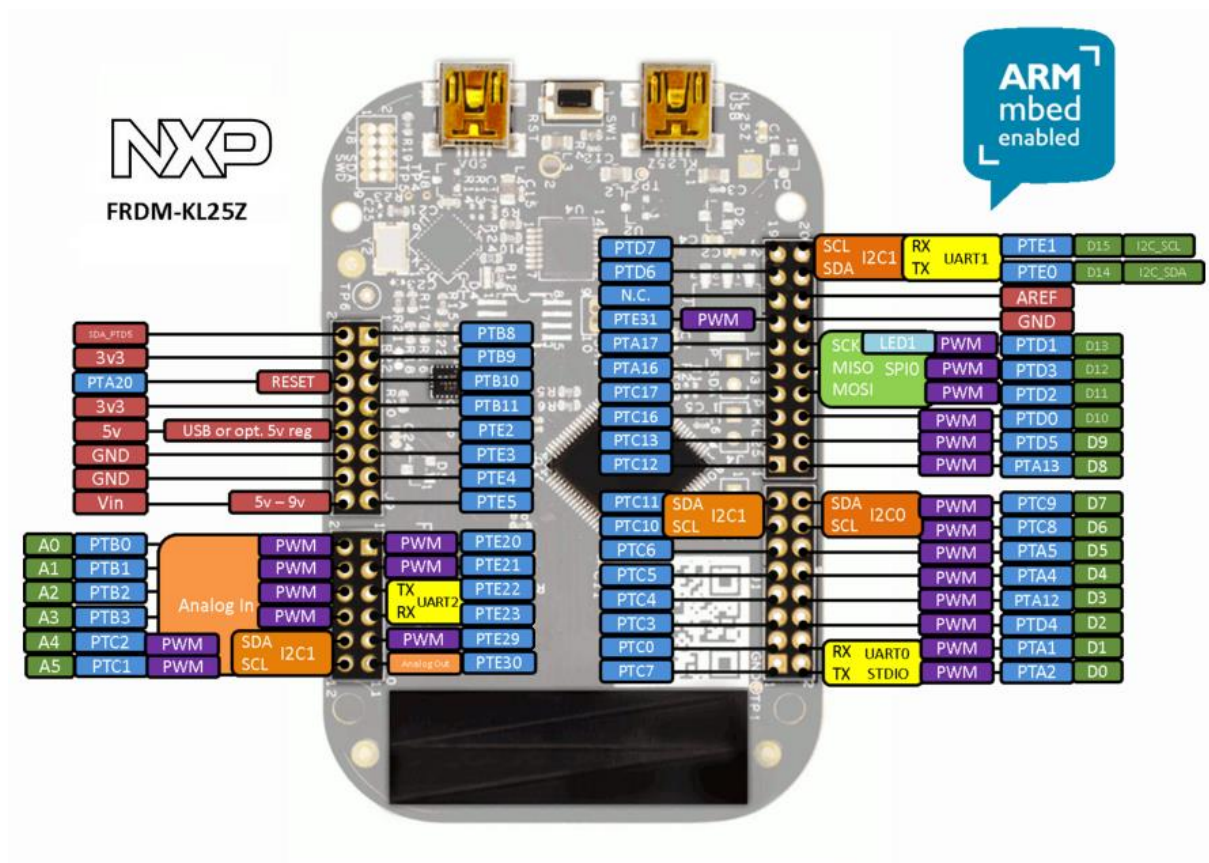
3.1.2.3 Spínací DPS

Spínací DPS byla navržena za účelem spínání dvojcestného ventilu a regulaci pumpy. Na DPS jsou pouze dva MOSFET tranzistory a je umístěna co nejbližší k pumpě a ventilu. Tranzistory jsou spínány pomocí signálů, generovaných z vývojového kitu. Je-li na tranzistor přivedená logická jednička, otevře se a připojí zařízení na společnou zem. Tím umožní průchodu proudu a zařízení začne fungovat. Ventil a pumpa pracují s napětím 12 V a jsou připojeni přímo na baterii. K regulaci rychlosti pumpy je použita pulzně šířková modulace, která mění šířku pulzu a tím se mění rychlost otáčení. Celé navržené schéma zapojení spínací DPS, motivy a osazovací výkresy jsou obsažené v **přílohách E a F**.

3.1.3 Vývojový kit FRDM-KL25Z

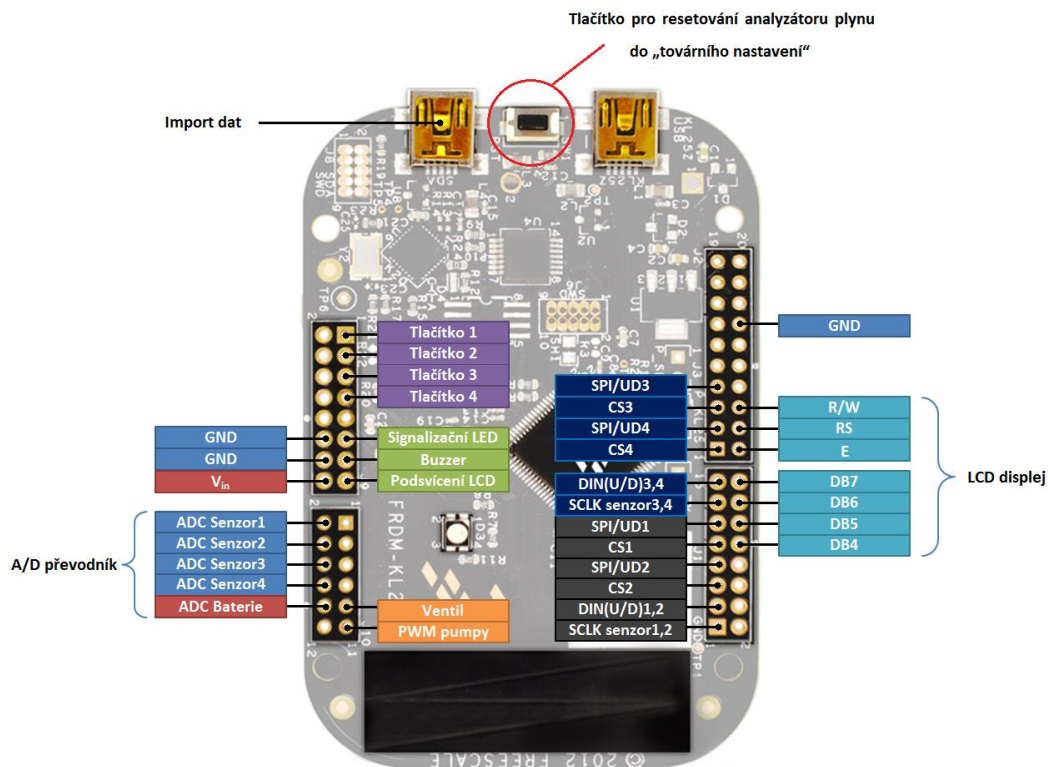
Vývojový kit od společnosti NXP s obchodním označením FRDM-KL25Z je v navrhovaném analyzátoru hlavní řídicí jednotkou. Jedná se o ultra levná vývojovou platformu založenou na ARM Cortex-M0+ procesoru. Tento procesor nabízí maximální pracovní frekvenci 48 MHz a vychází z předchozí modelové řady Cortex-M0. Ve struktuře jádra byly provedeny změny a tím došlo ke snížení spotřeby energie. Výrobce uvádí spotřebu 9,8 μ W na MHz. Pro uložení programu, hodnot proměnných či jiných dat využívá 128kB FLASH paměť doplněnou o 16kB RAM paměť. Vývojový kit nabízí mnoho analogových a digitálních periférií. Mezi komunikačními rozhraními lze nalézt dva 8-bitové SPI moduly, dva UART moduly, jeden energeticky úsporný UART modul, dva moduly pro I²C komunikaci a full-speed USB řadič. Pro snímání analogových hodnot lze využít 16-bitový analogově-digitální (D/A) převodník. Pro převod digitálního nespojitého signálu na spojitý analogový signál je možné využít 12-bitový digitálně-analogový (D/A) převodník. Dalším analogovým modulem, který lze nalézt v nabídce vývojového kitu je analogový komparátor (CMP), obsahující 6-bitový D/A převodník a programovatelný referenční vstup. Mezi časovače řadí výrobce 2-kanálový modul časovače/pulzně šířkové modulace (PWM), periodický časovač přerušení, hodiny reálného času a 16-bitový energeticky úsporný časovač. Dále vývojový kit disponuje 3-osým akcelerometrem, PWM říditelnou LED RGB diodou nebo dotykovým kapacitním senzorem. Napájet vývojový kit lze pomocí připojení USB rozhraní nebo externím zdrojem napětí.

V navrhovaném analyzátoru plynu využito externí napájení. Hodnota napětí musí být v rozmezí mezi 4,5 V a 9 V pro správnou funkci vývojového kitu. K účelu externího napájení je využíván vývod V_{in} a GND (*Obr. 3.18*).



Obr. 3.18 Vývojový kit FRDM-KL25Z [20]

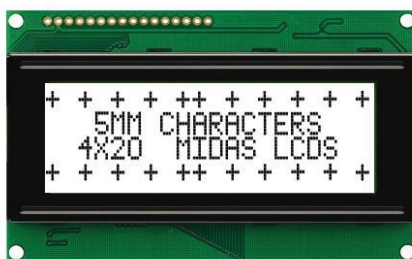
Ke snímání signálů vystupujících ze senzorů je použit A/D převodník, jehož vstupy jsou označeny *Analog in*. Na jeden z těchto vstupů je připojen signál, který odpovídá napětí na baterii. Vývojový kit disponuje 66 vývody, které lze nastavit jako vstup nebo výstup. Pomocí těchto vstupů/výstupů (GPIO) lze řídit periferie. Funkce vstupní brány je použita pro připojení klávesnice. LCD displej, LED dioda a MOSFET tranzistory jsou připojeny na výstupní brány. Tranzistory jsou použity pro spínání zvukové signalizace, dvoucestného ventilu, podsvícení displeje a řízení rychlosti pumpy. K řízení rychlosti je použita pulzně šířková modulace, při které se mění střída spínání a tím i spínací režim. Vývod v nastavení *výstup* je schopen generovat napětí 3 V a maximální poskytující proud je 25 mA. Přesné zapojení periferií je znázorněno na obrázku (Obr. 3.19).



Obr. 3.19 Zapojení vývodů [21]

3.1.4 LCD displej

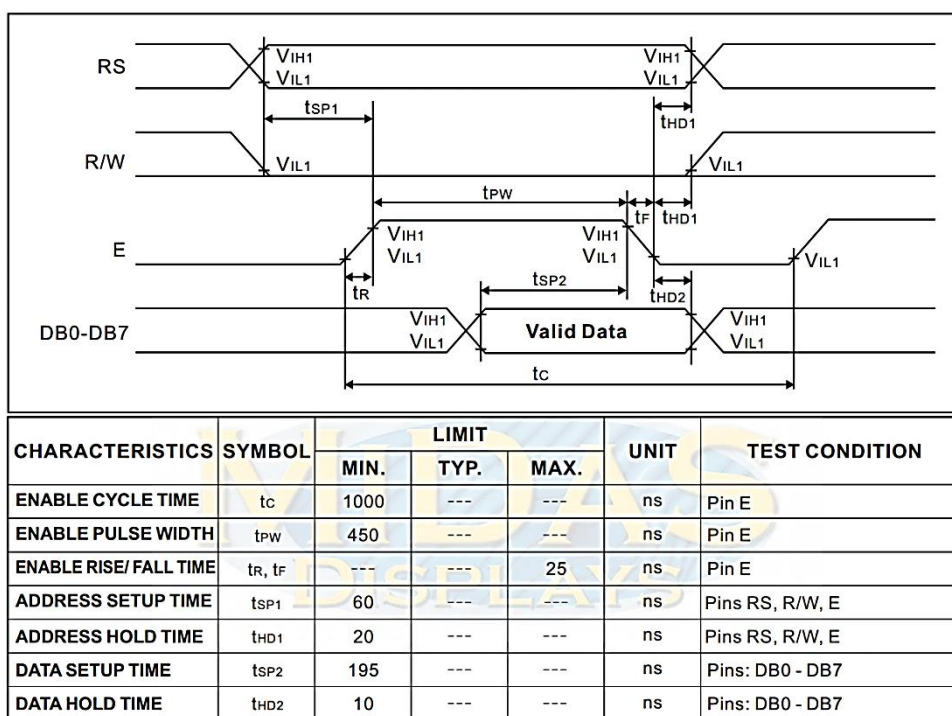
Hlavní náplní LCD displeje je vizuální zpětná vazba pro orientaci v programu. Pro tento účel byl použit dvacet znakový alfanumerický LCD displej se čtyřmi řádky od společnosti MIDAS (Obr. 3.20).



Obr. 3.20 Alfanumerický LCD displej [22]

Pro dobrou pozorovatelnost byl požadován displej, s co největším kontrastem. Tento požadavek byl splněn volbou tohoto displeje, který zobrazuje černé znaky na světlý podklad. Při zapnutí podsvícení se podklad blíží bílé barvě. Podsvícení zajišťuje LED dioda bílé barvy, která je zalita do světlovodného materiálu. Tento materiál je umístěn pod LCD vrstvou a rovnoměrně rozptyluje světlo skrz vrstvu. Podsvícení je napájeno přímo z vývodu

vývojového kitu, který je programově zapínán či vypínán, dle potřeby podsvícení. Displej je napájen z navržené *napájecí* DPS a řízen pomocí vývojového kitu KL25Z. Pro komunikaci mezi displejem a vývojovým kitem je potřeba sběrnice s minimálně sedmi vodiči. Čtyři vodiče jsou použity pro přenos dat a na displeji jsou připojeny na vývody DB4 – DB7 (vývody DB0 – B3 jsou nezapojeny). Dále pro funkci displeje je zapotřebí řídicích signálů. Signál *Data Read/Write* (R/W) se používá pro čtení nebo zápis do interní paměti displeje. Je-li hodnota R/W logická jednička, data jsou čtena z paměti. V opačném případě jsou data zapisována do paměti. Řídicí signál *Register Select Signal* (RS) povoluje zápis nebo vyčítání dat z paměti, je-li jeho hodnota v logické jedničce. Další řídicí signál je *Enable Signal* (E), který potvrzuje platnost dat na sběrnici. Data jsou posílána po čtyřech vodičích a lze tuto komunikaci označit jako čtyř bitovou. Řadič displeje však potřebuje 8-bitovou datovou hodnotu. Data o velikosti osmi bitů jsou kompletně přenesena po dvou cyklech. Pro zrychlení přenosu lze využít 8-bitové rozhraní, kterým LCD displej disponuje. Jedná se o rozšíření datové sběrnice na osm vodičů. V navrhovaném analyzátoru byla použita 4-bitová komunikace, která využívá předepsané časování pro zápis podle diagramu (Obr. 3.21).



Obr. 3.21 Časový diagram komunikace pro zápis [22]

3.1.5 Klávesnice

Klávesnice je hlavním ovládacím prvkem navrhovaného analyzátoru plynu. Jedná se o membránovou maticovou klávesnici, která je umístěna na předním panelu boxu. Klávesnice má čtyři tlačítka v jedné řadě (Obr. 3.22). Montáž je velice jednoduchá, stačí sejmout ochrannou fólii na zadní straně a klávesnici přilepit na určené místo.



Obr. 3.22 Membránová maticová klávesnice [23]

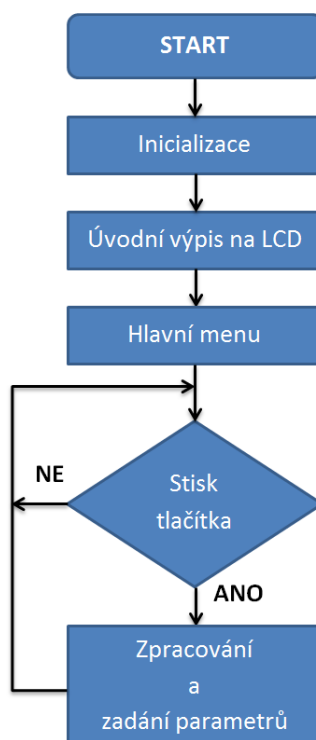
Připojení je pomocí pěti vývodů. První vývod je připojen na společnou zem navrhovaného analyzátoru plynu. Zbylé čtyři vývody jsou připojeny na vývojový kit na vstupy označeny PTB8/9/10/11. Odezva stisknutí klávesnice je 1 ms. Výhodou této klávesnice je jednoduchá montáž a její tenký profil.

4 Firmware analyzátoru plynu

4.1 Vývojové prostředí CodeWarrior

Pro tvorbu řídicího firmwaru analyzátoru plynu byl použit vývojový software CodeWarrior. Tento vývojový nástroj lze volně stáhnout na stránkách společnosti NXP, která vyrábí vývojový kit FRDM-KL25Z. Program je použitelný po omezenou dobu (30 dní). Po uplynutí této doby je nutno zakoupit licenci. Při programování lze použít již integrované *processor expert componetnty*. Tyto komponenty usnadňují vytváření firmwaru. Na začátku tvorby se volí platforma, na které firmware bude aplikován. V případě navrhovaného analyzátoru plynu je potřeba zvolit platformu MKL25Z128 obsaženou ve skupině Kinetis L Series. Po zvolení platformy je potřeba zvolit komunikaci, přes kterou bude vývojové prostředí komunikovat s reálnou platformou (vývojovým kitem KL25Z). Vývojový kit používá OpenSDA komunikaci. Jedná se o sériový port virtuálně vytvořený přes USB rozhraní. Pomocí něhož je možné importovat vyvíjený firmware do mikrokontroléru a debugovat jej.

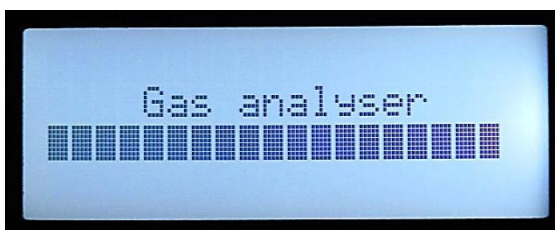
Celý princip firmwaru lze znázornit na zjednodušeném vývojovém diagramu (Obr. 4.1).



Obr. 4.1 Vývojový diagram

4.2 Funkce analyzátoru plynu

Při zapnutí analyzátoru plynu se na alfanumerickém LCD displeji zobrazí startovací obrazovka (Obr. 4.2). Při spouštění analyzátoru, jsou vyčítány důležitá data z FLASH paměti. Z paměti jsou vyčítány názvy senzorů, rychlost pumpy, heslo, kalibrační hodnoty senzorů a hodnota napětí pro signalizaci nízkého napětí baterie.

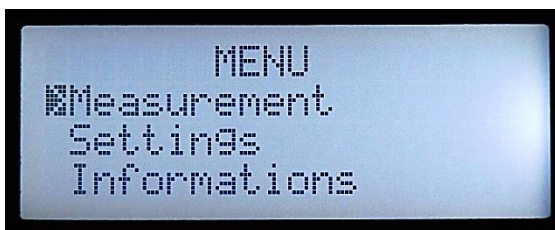


Obr. 4.2 Startovací obrazovka

Resetování analyzátoru do „továrního nastavení“ se provádí při startovací obrazovce. Důležité je držet tlačítko (Obr. 3.19) na vývojovém kitu při doběhu bar grafu. V tomto případě se vynuluje rychlost pumpy, kalibrační hodnoty senzorů a heslo. Heslo po tomto kroku je 0000 a senzory jsou nazvány Sens1, Sens2, Sens3 a Sens4. Hodnota napětí, při níž nastává signalizace vybité baterie, je nastavena na 11,8 V. Po resetování hodnot do „továrního nastavení“ jsou proměnné uloženy do FLASH paměti. Tento postup by měla znát pouze oprávněná osoba. Touto osobou může být technik, který obměňuje senzory plynů nebo provádí jejich kalibraci. Obsluha analyzátoru plynu má přístup pouze do funkcí, které nejsou chráněny heslem.

4.2.1 Menu analyzátoru plynu

Při doběhu bar grafu startovací obrazovky se zobrazí MENU analyzátoru plynu (Obr. 4.3). Pomocí klávesnice lze volit funkce analyzátoru. Výběr probíhá prostřednictvím šipek nahoru a dolů zobrazené na klávesnici a přístup do zvolené funkce stiskem šipky doprava.



Obr. 4.3 Obrazovka MENU

Na této obrazovce (Obr. 4.3) lze vstoupit do funkce *Measurement* (měření), *Settings* (nastavení) a *Informations* (informace).

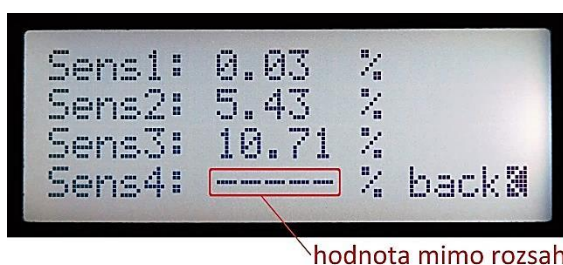
4.2.2 Funkce měření

Vstupem do funkce *measurement* je zobrazena obrazovka měření (Obr. 4.4). Na této obrazovce jsou zobrazena jména senzorů spolu s koncentracemi plynů. Každou vteřinu je vyčítána hodnota z A/D převodníku, která je přepočítávána podle rovnice (2.2) na koncentraci pro každý kanál.

$$U_{\text{senzoru}} = \frac{U_{A/D}}{0xFFFF} \cdot 3 \text{ [V]} \quad (2.1)$$

$$\text{Koncentrace} = \frac{U_{\text{senzoru}}}{2} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2.2)$$

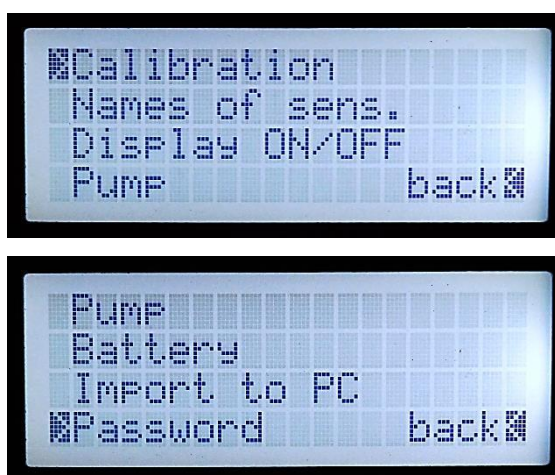
Vyčítané hodnoty jsou zapisovány do osmičíselného pole a jsou průměrovány. Vždy s novou hodnotou je obsah pole posunut doleva a na poslední pozici je zapsána nová hodnota. Nevýhodou tohoto průměrování je časové zpoždění při změně vstupní veličiny. Při kalibraci je průměrování sníženo na čtyři prvky, aby se zkrátil časový interval změny signálu ze senzoru. Nejsou-li připojeny všechny čtyři senzory, je nutné nepřipojené vstupy A/D převodníku připojit na společnou zem, a tím vytvořit nulový vstupní signál. Při nepřipojených vstupech je do A/D převodníku zanášena chyba a na LCD displeji jsou zobrazovány chybné hodnoty koncentrací plynů. Je-li na A/D převodník přivedeno napětí vyšší než 2 V, koncentrace dosahuje hodnot vyšších než 100 %. Tyto hodnoty nejsou reálné. Při vzniku této situace jsou na displeji zobrazeny oddělovače (- - - -), které signalizují, že hodnota koncentrace je mimo měřitelný rozsah. Stisknutím tlačítka se šipkou doleva se program vrátí zpět do *MENU*.



Obr. 4.4 Obrazovka *Measurement*

4.2.3 Funkce nastavení

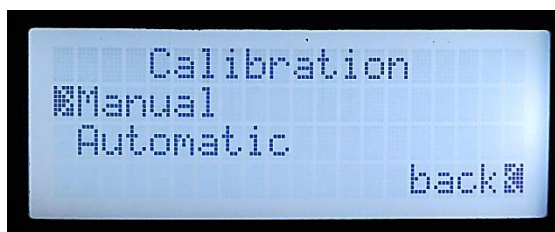
Při vstupu do *Settings* (nastavení) je umožněn výběr nastavení parametrů analyzátoru plynu. (Obr. 4.5). Některé parametry, které lze nastavit jsou chráněny heslem. Ochrana je nutná z důvodu správné funkce analyzátoru plynu. Nekvalifikované nastavení parametrů zavádí do měření chybu a výsledné koncentrace jsou mylné. Pohyb v nabídce *Settings* (nastavení) je pomocí „šipek nahoru a dolů“. Návrat zpět na obrazovku *MENU* vyvolá stisk tlačítka se šipkou doleva. Vstup na požadovanou volbu vyvolá stisk tlačítka se šipkou doprava.



Obr. 4.5 Nabídka Settings

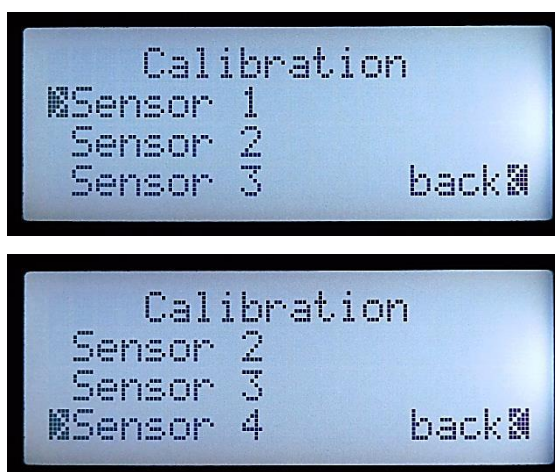
4.2.3.1 Kalibrace

V možnosti *Calibration* dochází ke kalibraci senzorů pomocí digitálních potenciometrů. Tato kalibrace je určena pro senzory s nízkonapěťovým signálem, jako je např. bateriový kyslíkový článek. Možnost kalibrace je potřeba, jelikož tyto články jsou velice závislé na tlaku a teplotě analyzované plynné směsi. Proto je nutné je častěji kalibrovat. Na rozdíl senzorů s napěťovým a proudovým výstupem jsou kalibrovány v delších intervalech. Při kalibraci těchto dvou typů je nutné otevření boxu. Pomocí víceotáčkových trimrů jsou nakalibrovány na požadovanou hodnotu, která je zobrazována na obrazovce ve funkci *Measurement*. Kalibrace senzorů s nízkonapěťovým výstupním signálem je prováděna pro každý senzor zvlášť. Při vstupu do možnosti *Calibration* je možné pomocí šipek na klávesnici zvolit mezi manuální a automatickou kalibrací. (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 Obrazovka výběru kalibrace

Při zvolení kalibrace dochází ke změně vstupu analyzované plynné směsi. Vstup kalibračního plynu je umístěn na zadním panelu boxu, vedle měřicího vstupu pro analyzovanou směs plynů. Výběr vstupů je měněn pomocí 3-cestného ventilu. Ten je ovládán *spínací* DPS, na níž jsou umístěny MOSFET tranzistory. K sepnutí dochází v okamžiku, kdy uživatel zvolí typ kalibrace. Po výběru kalibrace je obsluha vyzvána k výběru senzoru, jaký má být kalibrován (Obr. 4.7).



Obr. 4.7 Obrazovka pro výběr senzoru

Je-li zvolena manuální kalibrace, objeví se obrazovka, kde je zobrazena měřená koncentrace (Obr. 4.8). Obsluha analyzátoru pomocí „šipek nahoru a dolů“ kalibruje senzor na známou koncentraci kalibračního plynu. Pro bateriové kyslíkové senzory lze využít okolní vzduch, který obsahuje 20,95 % kyslíku.



Obr. 4.8 Nastavení kalibrační hodnoty

Ve chvíli kdy obsluha stiskne tlačítko se šipkou nahoru nebo dolů je v programu volána funkce, která zajišťuje komunikaci mezi vývojovým kitem a digitálním potenciometrem. Komunikace probíhá dle časového diagramu (Obr. 3.13), která je popsána v kapitole 3.1.2.2. Digitální potenciometr upravuje napěťové zesílení operačního zesilovače. Změnou zesílení dochází k úpravě napěťového signálu přiváděného na A/D převodník. V programu je tento napěťový signál přepočítán na koncentraci plynu, která je zobrazována obsluze. Při opuštění kalibrační funkce je ventilem změněn vstup plynu z kalibračního zpět na měřicí.



Obr. 4.9 Vývojový diagram manuální kalibrace

Automatická kalibrace je softwarovým vylepšením stávající ruční kalibrace. Opět je po volbě kalibrace sepnut 3-cestný ventil, který změní vstup plynné směsi. Po volbě senzoru je obsluha vyzvána k zadání požadované kalibrační hodnoty (Obr. 4.10).



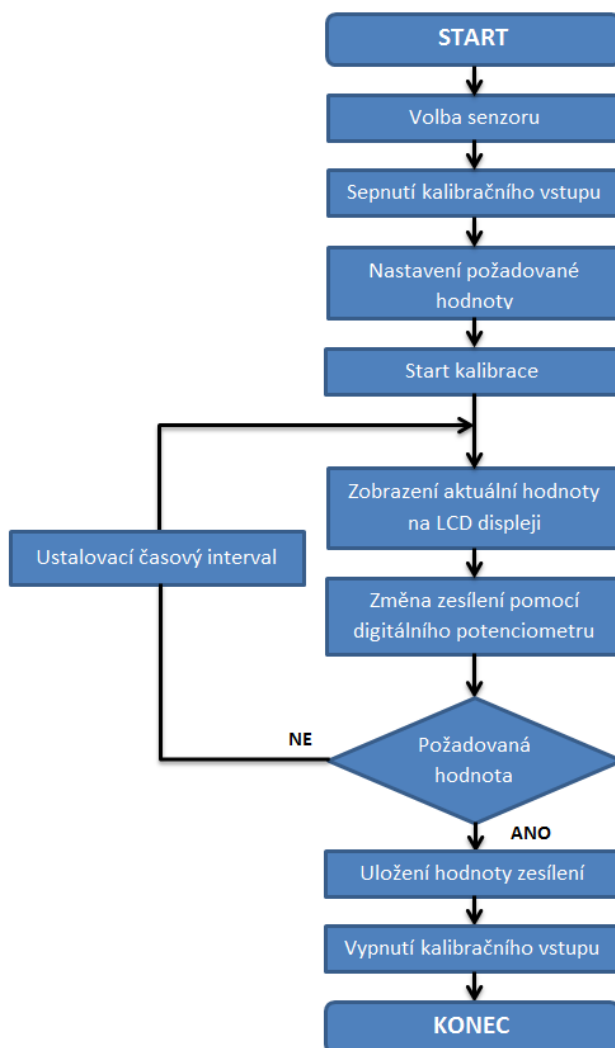
Obr. 4.10 Obrazovka nastavení kalibrační koncentrace

Po zadání požadované hodnoty, obsluha dává pokyn ke startu kalibrace. Na LCD displeji je zobrazována aktuální měřená koncentrace (Obr. 4.11). Změnou odporu digitálního potenciometru vede ke změně zesílení operačního zesilovače, a tím dosažení požadované hodnoty. Mezi jednotlivou změnou zesílení je potřeba vyčkat dostatečnou dobu, aby se ustálila snímaná hodnota.



Obr. 4.11 Obrazovka při automatické kalibraci

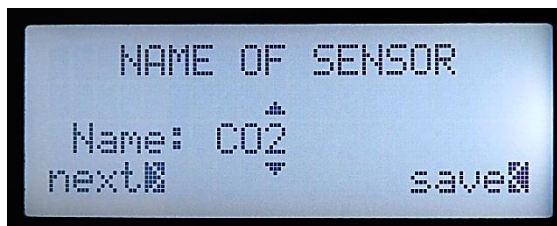
Dosahuje-li koncentrace měřeného plynu po ustalovacím časovém intervalu $\pm 0.03\%$ zadané kalibrační hodnoty, na displeji je zobrazena informační obrazovka o provedené kalibraci (Obr. 4.12). Po kalibraci je změněn vstup plynu zpět na měřicí vstup. Volba kalibrace je na uvážení obsluhy. Automatická kalibrace je časově náročnější díky ustalovacímu časovému intervalu a při kalibraci malého rozdílu mezi požadovanou a skutečnou koncentrací je výhodnější využít manuální kalibraci.



Obr. 4.12 Vývojový diagram automatické kalibrace

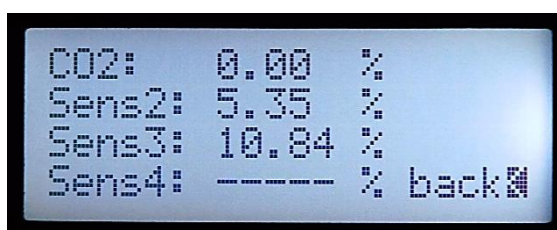
4.2.3.2 Názvy senzorů

Další možností uživatelské konfigurace je změna názvů senzorů (Obr. 4.13). Funkce je obsluhuje zpřístupněna v možnosti *Names of sens.*, kde prostřednictvím „šipek“ je volen senzor. Délka názvu je limitována na šest znaků. Pomocí „šipek nahoru a dolů“ lze volit velká a malá písmena abecedy nebo číslice. To znamená, že při stisku tlačítka se inkrementuje nebo dekrementuje hodnota proměnné, která odpovídá znaku v ASCII tabulce. Tlačítkem se šipkou doprava je umožněn posun na pozici dalšího znaku. Je-li kurzor na pozici posledního znaku (šestý znak), stiskem „šipky doprava“ je vykonán skok na první pozici v názvu. Tuto funkci lze využít při chybném zadání názvu.



Obr. 4.13 Obrazovka zadávání názvu senzoru

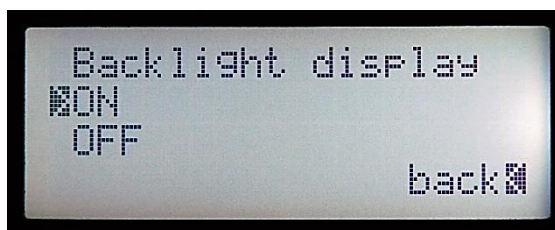
Stiskem „šipky doleva“ je název uložen do FLASH paměti a při následujícím startu analyzátoru plynu je název vyčten z paměti. Název senzoru se změní pouze ve funkci *Measurement* (Obr. 4.14).



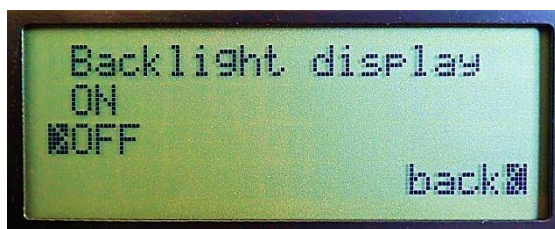
Obr. 4.14 Obrazovka measurement

4.2.3.3 Vypnutí/Zapnutí podsvícení displeje

Analyzátor plynu umožňuje obsluze vypnout podsvícení alfanumerického LCD displeje (Obr. 4.15a). Funkci nalezneme v nabídce *Settings* (nastavení) v možnosti *Display ON/OFF*. Dle požadavků je volen výběr zapnutí či vypnutí posvícení displeje. Displej je připojen na jeden výstup vývojového kitu a jedná se tedy o změnu úrovně na tomto výstupu. Přivedením logické jedničky (3 V) na výstup je podsvícení zapnuté. V případě logické nuly (0 V) displej funguje bez podsvícení (Obr. 4.15b).



a)



b)

Obr. 4.15 Displej (a – Podsvícený, b – Nepodsvícený)

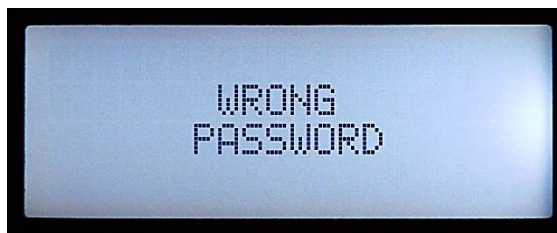
4.2.3.4 Rychlost pumpy

Detekce senzorů plynů je závislá na správném průtoku přiváděného plynu. K regulaci průtoku je použita pumpa, která vhání analyzovanou plynou směs do analyzátoru. Kvalifikované osobě je umožněna funkce nastavení rychlosti pumpy. Tuto funkci lze nalézt v možnostech *Settings* (nastavení) pod názvem *Pump*. Správná hodnota průtoku plynu je důležitá pro správnou funkci analyzátoru, proto změna rychlosti je chráněná heslem (Obr. 4.16).



Obr. 4.16 Obrazovka zadávání hesla

Je-li heslo chybně zadané, zobrazí se obrazovka, která informuje obsluhu o chybně zadaném hesle (Obr. 4.17).



Obr. 4.17 Obrazovka při špatně zadaném hesle

Je-li heslo správné, umožní se obsluze nastavit rychlost pumpy. Rychlost je možné nastavit v rozsahu 0 – 100 % (Obr. 4.18).



Obr. 4.18 Obrazovka nastavení rychlosti pumpy

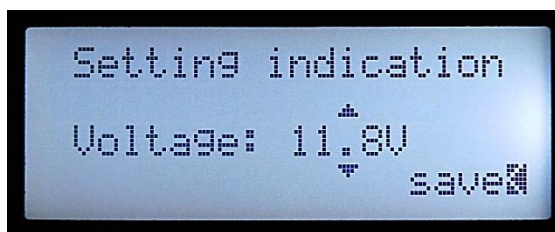
4.2.3.5 Indikace nízkého napětí baterie

Kvůli mobilitě je analyzátor plynu vybaven olovo-kyselinovým akumulátorem. Analyzátor plynu je schopen své funkce po omezenou dobu při běhu na akumulátor. Tato doba je limitována výdrží baterie. Systém je vybaven optickou a zvukovou signalizací nízkého napětí akumulátoru. Nastavení zapnutí signalizace lze nastavit v možnosti *Battery*. Při vstupu do této možnosti je zobrazena obrazovka, která zobrazuje aktuální napětí baterie a volbu nastavení signalizace (Obr. 4.19).



Obr. 4.19 Obrazovka *Battery*

Stiskem tlačítka se šipkou doprava se zobrazí obrazovka *Setting indication*. Na této obrazovce pomocí „šipek nahoru a dolů“ je nastavováno napětí signalizace v rozsahu 11,8 – 14 V (Obr. 4.20). Stiskem tlačítka se šipkou doleva je hodnota uložena do paměti.

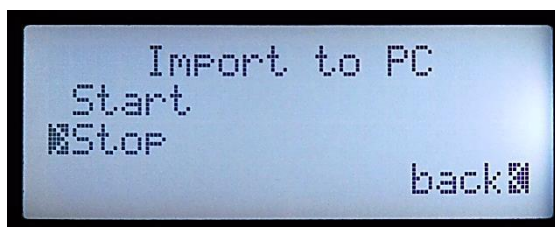


Obr. 4.20 Obrazovka nastavení indikace

V „továrním nastavení“ je mez signalizace nastavena na 11,8 V. Toto napětí je limitní pro olověné akumulátory, kdy nedochází k jeho poškození. Vybíjením pod tuto mez napětí je rapidně snižována životnost akumulátoru. Při dosažení stejného napětí na akumulátoru jako je signalizační napětí, dochází k rozblikání LED diody a zvukového upozornění. LED dioda umístěná na předním panelu analyzátoru plynu signalizuje nízké napětí do doby, kdy je napětí akumulátoru vyšší než hodnota signalizačního napětí.

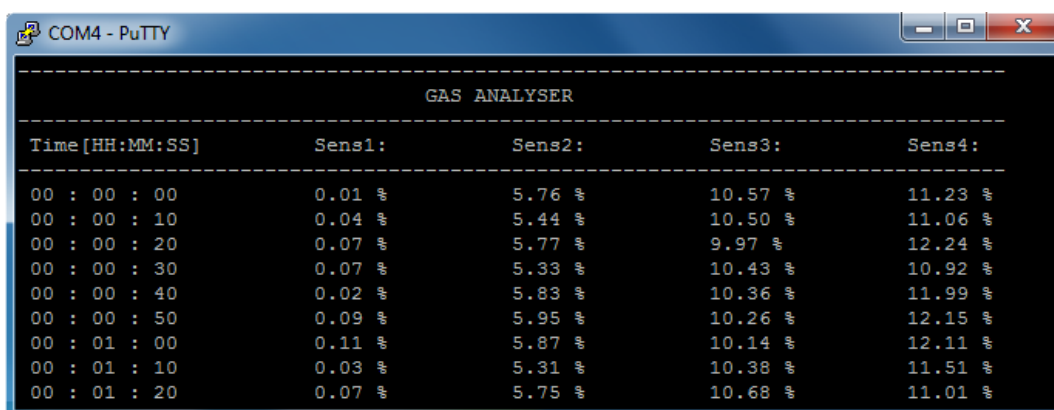
4.2.3.6 Sběr dat do osobního počítače

Analyzátor plynu je vybaven funkcí sběru naměřených dat do osobního počítače. Funkci lze zapnout v možnosti *Import to PC*, která je umístěna v *Settings*. Obsluha analyzátoru pomocí „šipek nahoru a dolů“ volí mezi startem sběru dat do osobního počítače nebo zastavením (Obr. 4.21).



Obr. 4.21 Obrazovka sběru dat

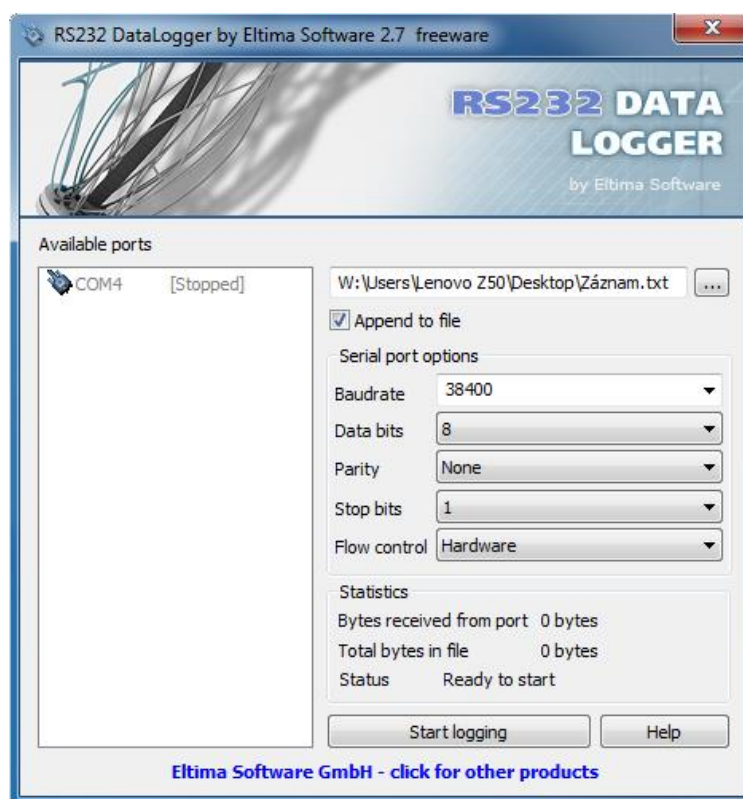
Volbou *Start* je zapnuta sériová komunikace mezi analyzátozem a osobním počítačem. Odesílání měřených dat začíná při vstupu do funkce *Measurement*. Data jsou odesílána v deseti vteřinových intervalech. Opuštěním obrazovky *Measurement* je komunikace pozastavena a při opětovném návratu je opět spuštěna. Komunikaci je možné trvale ukončit v možnosti *Import to PC*. Sběr dat je možný, pokud je v osobním počítači nainstalován software, který umožňuje komunikaci po sériovém portu. Programy podporující komunikaci po sériovém portu lze volně stáhnout na libovolných webových stránkách. V této práci byl použit program *PuTTY*. Tento program slouží k zobrazení dat na osobním počítači v reálném čase po zapnutí sběru dat v možnosti *Import to PC* (Obr. 4.22).



Time [HH:MM:SS]	Sens1:	Sens2:	Sens3:	Sens4:
00 : 00 : 00	0.01 %	5.76 %	10.57 %	11.23 %
00 : 00 : 10	0.04 %	5.44 %	10.50 %	11.06 %
00 : 00 : 20	0.07 %	5.77 %	9.97 %	12.24 %
00 : 00 : 30	0.07 %	5.33 %	10.43 %	10.92 %
00 : 00 : 40	0.02 %	5.83 %	10.36 %	11.99 %
00 : 00 : 50	0.09 %	5.95 %	10.26 %	12.15 %
00 : 01 : 00	0.11 %	5.87 %	10.14 %	12.11 %
00 : 01 : 10	0.03 %	5.31 %	10.38 %	11.51 %
00 : 01 : 20	0.07 %	5.75 %	10.68 %	11.01 %

Obr. 4.22 Zobrazení přenesených dat v programu PuTTY

Pro záznam dat do textového souboru byl použit program *RS232DataLogger*. Tento program lze bezplatně stáhnout na webových stránkách [24]. Při spuštění programu je zobrazeno jednoduché uživatelské prostředí (Obr. 4.23).



Obr. 4.23 Program RS232DataLogger

Pro správnou funkci programu je nutné nastavit parametry sériové komunikace.

4.2.3.7 Nastavení hesla

Poslední možností ve funkci *Settings* je změna hesla. Jak bylo zmíněno výše, heslo slouží k uzamčení důležitých funkcí analyzátoru, které ovlivňují jeho správnou činnost. Při vstupu do této možnosti je po obsluze vyžadováno heslo. Po zadání správného hesla je zobrazena obrazovka, na které je obsluha vyzvána pro zadání nového hesla (*Obr. 4.24*).



Obr. 4.24 Obrazovka pro zadání nového hesla

Volba čísel je pomocí „šipek nahoru a dolů“ a přesun na další pozici pomocí „šipky doprava“. Stiskem „šipky doleva“ je přesun k dalšímu kroku volby nového hesla. Zobrazí se obrazovka, kde je obsluha vyzývána k opětovnému zadání nového hesla (*Obr. 4.25*).



Obr. 4.25 Opětovné zadávání hesla

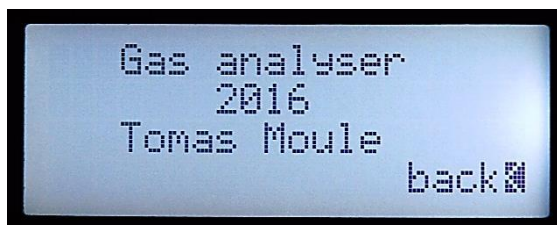
Není-li heslo stejné, na displeji se zobrazí varovná hláška „*WRONG NEW PASSWORD*“ (*Obr. 4.26*).



Obr. 4.26 Obrazovka při zadání špatného hesla

4.2.4 Informace o analyzátoru plynu

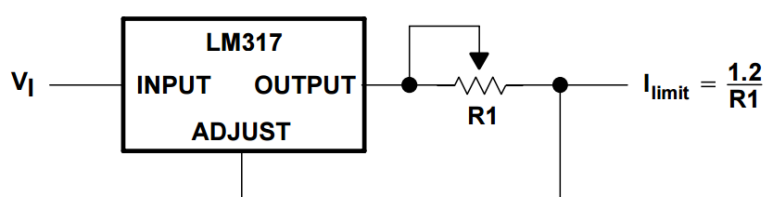
Poslední funkci, kterou lze nalézt v *MENU* analyzátoru jsou *Informations* (Obr. 4.27). Funkce je určena pro zobrazení informací o analyzátoru plynu. Je zde možné zobrazit kontaktní informace na servisní obsluhu nebo internetový odkaz na návod k použití.



Obr. 4.27 Obrazovka informace

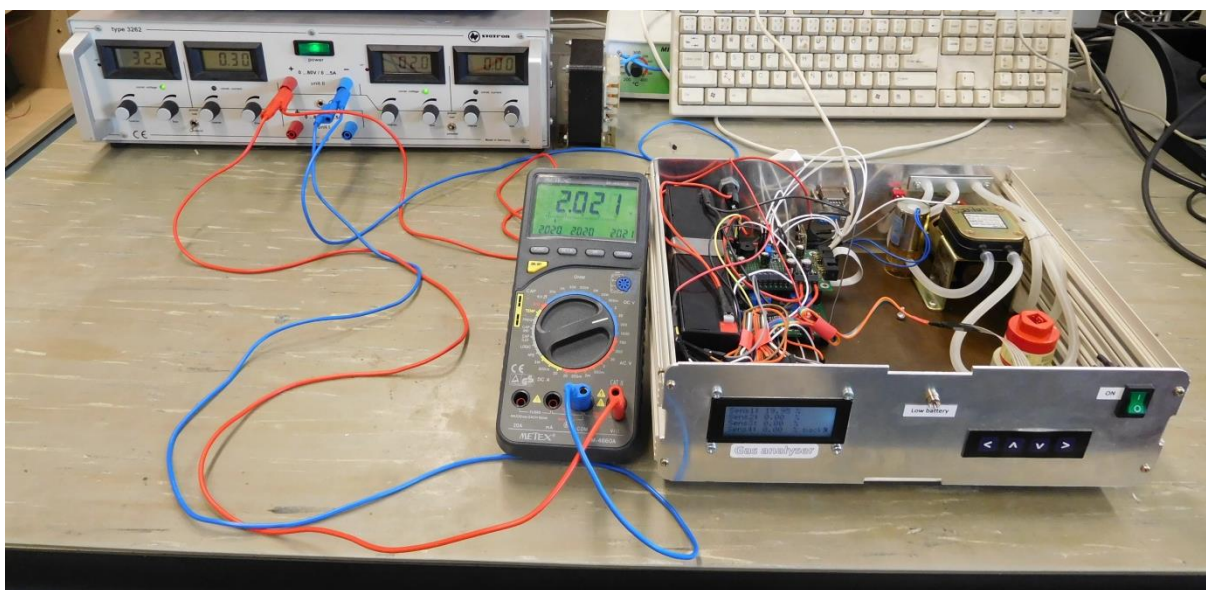
5 Ověření funkčnosti

Pro ověření funkčnosti realizovaného analyzátoru plynu bylo provedeno kontrolní měření. Z důvodu vysoké ceny senzorů byl připojen pouze jeden senzor, a to kyslíkový senzor, který slouží pro ověření funkce kalibrace digitálními potenciometry. Sensory s napěťovým výstupním signálem v rozsahu 0 – 10 V byly simulovány laboratorním zdrojem. Sensory s proudovým výstupním signálem v rozsahu 0 – 20 mA byly simulovány proudovým zdrojem. Zdroj proudu byl vytvořen pomocí stabilizátoru LM317 podle katalogového zapojení (Obr. 5.1).



Obr. 5.1 Nastavitelný zdroj proudu [25]

5.1 Napěťový výstupní signál



Obr. 5.2 Měřicí pracoviště

K ověření funkce byl použit laboratorní zdroj napětí a na signálové desce, pomocí DIP spínačů, byla zvolena napěťová cesta signálu. Při přivedení napětí na *signálovou* DPS byla nutná kalibrace. Hodnota odpovídající 10 V je 100% koncentrace, která je zobrazována na displeji. K nastavení požadované koncentrace je použit víceotáčkový trimr. Funkce každého

kanálu byla ověřována jednotlivě. Po kalibraci byl proměřen celý rozsah napěťového signálu od 0 – 10 V.



Obr. 5.3 Zapojení měřícího pracoviště - Napěťový signál

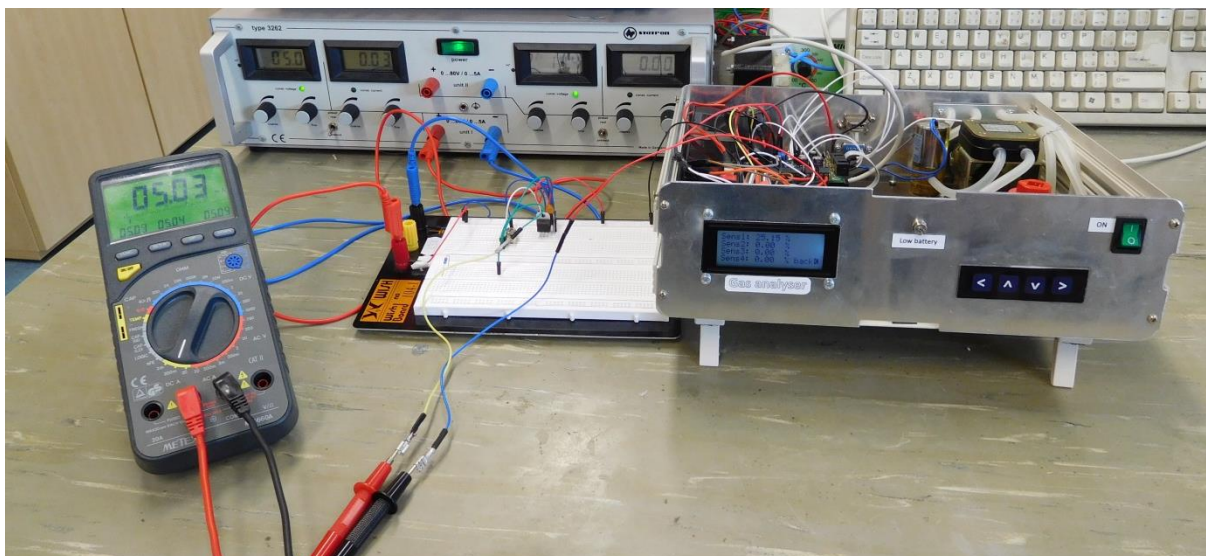
Tab. 4 Napěťová cesta - 1. kanál

Kanál 1			
Vzorek	U měř. [V]	Koncentrace měř. [%]	Koncentrace teor. [%]
0	10,00	99,99	100
1	9,02	90,04	90,16
2	8,04	80,26	80,38
3	7,01	70,14	70,05
4	5,99	59,8	59,87
5	4,99	49,99	49,93
6	4,00	39,99	40
7	3,00	30,08	30
8	2,00	19,97	19,97
9	1,01	10,11	10,14
10	0,00	0	0

Tab. 5 Napěťová cesta - 2. kanál

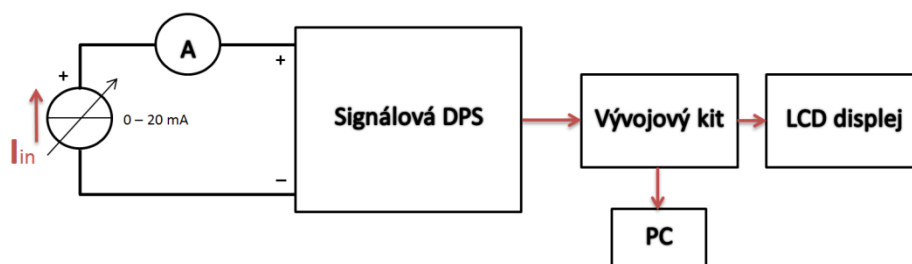
Kanál 2			
Vzorek	U měř. [V]	Koncentrace měř. [%]	Koncentrace teor. [%]
0	10,00	99,92	100
1	9,03	90,07	90,3
2	8,05	80,02	80,5
3	7,00	69,98	70
4	5,99	60,15	59,89
5	5,01	50,03	50,1
6	4,00	39,94	40
7	3,00	29,99	30
8	2,01	20,08	20,1
9	1,01	10,13	10,1
10	0,00	0	0

5.2 Proudový výstupní signál



Obr. 5.4 Měřicí pracoviště

K ověření funkce byl použit regulovatelný zdroj proudu, realizovaný na nepájivém poli obvodem LM317. Před připojením proudového signálu bylo zapotřebí změnit cestu signálu, pomocí dvou DIP spínačů. Po přivedení proudového signálu na *signálovou* DPS byla nutná kalibrace obvodu, která byla realizována stejným způsobem jako u kalibrace napěťového signálu. Po kalibraci na požadovanou hodnotu, byl proměřen celý rozsah proudového signálu od 0 –20 mA.



Obr. 5.5 Zapojení měřicího pracoviště - Proudový signál

Tab. 6 Proudová cesta - 1. kanál

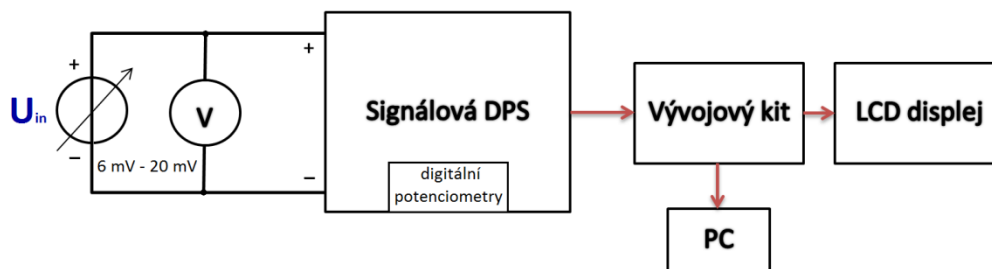
Kanál 1			
Vzorek	I měř. [mA]	Koncentrace měř. [%]	Koncentrace teor. [%]
0	20,00	99,98	100
1	18,00	89,88	90
2	16,03	80,05	80,15
3	13,99	69,94	69,95
4	12,03	60,05	60,15
5	10,00	49,97	50
6	7,98	39,94	39,9
7	6,02	30,04	30,1
8	4,02	20,08	20,1
9	1,98	9,92	9,9
10	0,00	0	0

Tab. 7 Proudová cesta - 2. kanál

Kanál 2			
Vzorek	I měř. [mA]	Koncentrace měř. [%]	Koncentrace teor. [%]
0	20,00	99,96	100
1	18,07	90,31	90,35
2	16,01	79,99	80,05
3	14,00	69,95	70
4	11,99	59,93	59,95
5	10,07	50,32	50,35
6	7,98	39,86	39,9
7	5,96	29,79	29,8
8	4,02	20,06	20,1
9	2,03	10,14	10,15
10	0,00	0	0

5.3 Nízkonapět'ový výstupní signál

Měření probíhalo jako dvě předchozí. Důležitým ověřovacím úkonem, bylo nastavení požadované hodnoty koncentrace pomocí digitálních potenciometrů. Připojením nízkonapět'ového signálu (např. 9 mV) na vstup signálové desky, byl simulován kyslíkový článek. Hodnota přivedeného napětí odpovídá koncentraci (20,95 %) kyslíku ve vzduchu. Výstupní signál kyslíkového článku je závislý na tlaku, a proto je nutná častější kalibrace.



Obr. 5.6 Zapojení měřicího pracoviště - Nízkonapěťový signál

Po ověření správné funkce nízkonapěťové cesty signálu, byl připojen reálný kyslíkový senzor. Zde se projevilo dopravní zpoždění plynu při průchodu plynovým systémem hadiček. Proto je při kalibraci nutné vyčkat dostatečnou dobu, než dojde k propláchnutí systému a poté kalibrovat signál na správnou hodnotu koncentrace. Dopravní zpoždění je závislé na délce přívodních hadiček a objemu dodávaného plynu.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prostudovat problematiku chemických plyných senzorů a následně vytvořit zařízení určené pro analýzu plyných směsí. Po doplnění odpovídajících senzorů musí navrhovaný elektronický systém na bázi mikrokontroleru umožňovat měření určitých plynů, dále jednoduchou kalibraci pomocí digitálních potenciometrů a zobrazovat naměřené hodnoty s možností sběru dat do osobního počítače. Po zhotovení popisovaného zařízení byla jeho funkce testována ověřujícím měřením.

První část diplomové práce je věnována teoretickému rozboru, který vystihuje vlastnosti senzorů různých plynů. Vysvětleny jsou základní pojmy týkající se senzorů, dále se zabývá technologií výroby, která se využívá k realizaci senzorů.

Druhá část této práce popisuje vlastní návrh elektronického zařízení pro analýzu plyných směsí. Tato část se věnuje popisu struktury navrhovaného systému. Popsáno je blokové schéma navrhovaného systému a jednotlivé komponenty důležité pro činnost zařízení. Následně se práce věnuje obvodovým řešením napájecí a signálové části zařízení, ve kterém jsou popsány jednotlivé bloky, dále návrhu firmwaru, který tvoří uživatelské rozhraní zařízení a v poslední části jsou popsány jednotlivá ověřování měření sloužící pro ověření funkčnosti navrhovaného systému.

Zrealizovaný analyzátor testů je schopen zpracovat tři druhy lineárních výstupních senzorových signálů. Lze tudíž připojit senzory disponující normalizovaným napěťovým výstupem 0 – 10 V, normalizovaným proudovým výstupem 0 – 20 mA a nízkonapěťovým výstupem, který dosahuje jednotek mV. Výběr mezi jednotlivými vstupy je prováděn pomocí DIP spínačů umístěných vně boxu analyzátoru. Důležitým požadavkem byla kalibrace senzorů. Senzory s napěťovým a Proudovým výstupním signálem lze kalibrovat při připojení k analyzátoru pomocí víceotáčkových trimrů, umístěných vedle vstupních svorek vně boxu analyzátoru. Senzory s nízkonapěťovým signálem vyžadují častější kalibraci, díky závislosti na okolních vlivech. Použitý nízkonapěťový senzor kyslíku je náchylný na změnu tlaku vzduchu, který se mění v celém průběhu dne, a proto je kalibrace prováděna prostřednictvím menu analyzátoru a není zapotřebí přístupu do boxu analyzátoru. Firmware zajišťuje určitou bezpečnost pro nastavení důležitých parametrů. Funkce kalibrace je chráněna heslem, jelikož nekvalifikovaným nastavením hodnot může dojít k znehodnocení měřených dat. Pro správné měření je potřeba určitého průtoku plyné směsi, který lze nastavit změnou rychlosti pumpy. Tato funkce je taktéž chráněna heslem, aby nekvalifikovaným zásahem nedošlo ke špatnému nastavení. Další heslem chráněnou funkcí je nastavení indikace nízkého

napětí na akumulátoru. Nekvalifikované nastavení hodnoty pro indikaci nízkého napětí na baterii může vést k poškození akumulátoru. Přístupové heslo pro tyto důležité funkce by měla znát pouze kvalifikovaná osoba, která provádí kalibraci a správu analyzátoru plynu. Dále analyzátor plynu disponuje uživatelskými funkcemi jako je vypnutí podsvícení displeje, nastavení hesla a pojmenování připojených senzorů. Pohyby ve firmwaru jsou zobrazovány na čtyřřádkovém displeji. Provedeným ověřovacím měřením byla ověřena funkčnost navrženého analyzátoru plynu.

O přínosu této práce lze uvažovat s využitím pro analýzu plyných směsí, jelikož se jedná o univerzální zařízení, který je schopno zpracovávat až tři typy sensorových signálů, má uplatnění v široké oblasti, lze jej využít např. v lékařství při analýze dechu pacientů, na kterých se provádějí zdravotní zátěžové testy, nebo v podnicích k ochraně zaměstnanců před nebezpečnými plyny.

Námětem pro budoucí rozšíření je možnost připojení nelineárních sensorových výstupů a normalizovaného proudového signálu 4 – 20 mA. Pro připojení nelineárních senzorů by bylo nutné doplnit firmware o linearizaci. Dalším námětem na vylepšení je návrh obvodu pro správu nabíjení a vybíjení akumulátoru, který je součástí analyzátoru. Tento obvod by odpojoval baterii při plném nabití či vybití. Hardwarovým vylepšením by bylo doplnění analyzátoru o senzor teploty a tlaku analyzovaného plynu pro vytvoření korekční smyčky senzorů.

Výsledkem této diplomové práce je funkční vzorek analyzátoru plynu, který byl ověřen pomocí simulovaných sensorových signálů a pouze jedním reálným senzorem s nízkonapěťovým výstupním signálem. Důvodem byla vysoká pořizovací cena reálných senzorů. Pro přesné ověření by bylo ovšem nutné použít vícero typů reálných senzorů plynu a porovnat naměřené výsledky s certifikovaným analyzátozem plynu. Při testování se projevilo dopravní zpoždění plyné směsi a výsledky jsou tudíž zobrazovány se zpožděním. Při konstrukci následující verze by bylo, proto vhodné realizovat některé úpravy, které vznikly při ožívování této první verze.

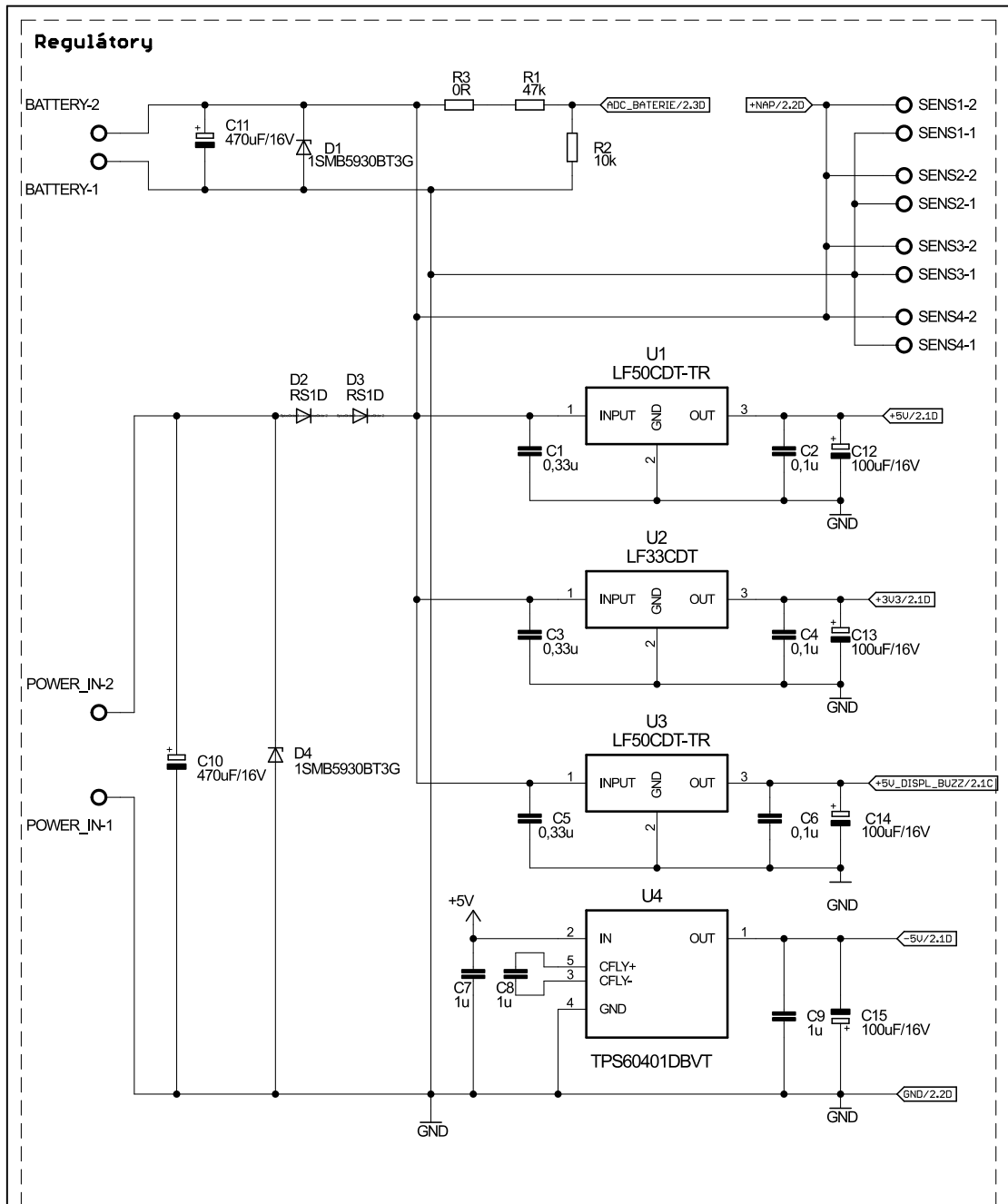
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Ripka, Pavel, Stanislav Ďaďo, Marcel Kreidl, Jiří Novák. *Senzory a převodníky*. Praha: ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03123-3.
- [2] FORMÁNEK, Josef. *Výukové texty* [online]. 2012. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/ivk-mt-soubory/01-F.pdf>
- [3] HUSÁK, Miroslav. *Parametry senzorů* [online]. 2008. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/>
- [4] HAMÁČEK, Aleš. *Technologie tenkých a tlustých vrstev* [online]. 2015. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/ktl/studijni-materialy.html>.
- [5] *Senzory v mechatronických soustavách* [online]. 2015. [cit. 2016-02-24]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/7267857-1-senzory-v-mechatronickych-soustavach.html>
- [6] HUSÁK, Miroslav. *Proč senzory* [online]. 2015. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/x34ses/>
- [7] *Chemické plynné senzory* [online]. 2015. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/portal/studium/courseware/kae/sac/prednasky.html>
- [8] *Tenkovrstvé piezoelektrické senzory* [online]. 2016. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf
- [9] OTTE, Lukáš. *Technické prostředky automatizace* [online]. 2007. [cit. 2016-03-04]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~ott007/TPA-Otte.htm>
- [10] *Automa* [online]. Děčín: Automa-časopis pro automatizační techniku, s. r. o., 2001, **2001**(10) [cit. 2016-03-04]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://automa.cz/index.php?id_document=33683
- [11] HRUŠKA, František. *SENZORY* [online]. Druhé. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010 [cit. 2016-03-7]. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné z: www.utb.cz/file/15534_1_1/
- [12] *Chemické senzory* [online]. 2009. [cit. 2016-03-07]. Dostupné z: <http://measure.feld.cvut.cz/cs/system/files/files/cs/vyuka/predmety/x38szp/10-chemick.pdf>
- [13] *Ampérometrie* [online]. 2016. [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://ach.upol.cz/user-files/intranet/prednaska-5-10-podklady-1291243244.pdf>
- [14] KADLEC, KAREL A MILOŠ KMÍNEK. *Měřicí a řídicí technika* [online]. 2005.

- [cit. 2016-04-10]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/>
- [15] KSV NIMA Technologies. *Biolin Scientific*. [online]. 2016 [cit. 2016-02-22]. Dostupné z: <http://www.biolinscientific.com/ksvnima/technologies/>
- [16] RIPKA, PAVEL. *Chemické senzory* [online]. 2011. [cit. 2016-03-03]. Dostupné z: http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/11_Chemické%20senzory.pdf
- [17] Akumulatory Nerbo. *NERBO*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.akumulatory-nerbo.pl>
- [18] AD694ARZ. *Analog devices*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.analog.com/en/products/amplifiers/instrumentation-amplifiers/ad694.html>
- [19] MAX5483. *Maxim Integrated*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/datasheet/index.mvp/id/4730>
- [20] FRDM-KL25Z. *ARMmbed*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://developer.mbed.org/platforms/KL25Z/>
- [21] FRDM-KL25Z. *NXP products*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.nxp.com/products/software-and-tools/hardware-development-tools/freedom-development-boards/freedom-development-platform-for-kinetis-kl14-kl15-kl24-kl25-mcus:FRDM-KL25Z>
- [22] MC42004A6W. *Farnell element 14*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/midas/mc42004a6w-fptlw/lcd-4x20-fstn-white-led-b-l-5v/dp/2063174>
- [23] Arduino klávesnice membránová 1x4. *ARDUINO-SHOP*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://arduino-shop.cz/arduino/1006-arduino-klavesnice-membranova-1x4-1427823380.html?gclid>
- [24] RS-232 Data Logger. *SOURCEFORGE*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://sourceforge.net/projects/rs232portlogger/>
- [25] LM317. *Texas Instruments*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317.pdf>
- [26] TPS60403. *Texas Instruments*. [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TPS60403>

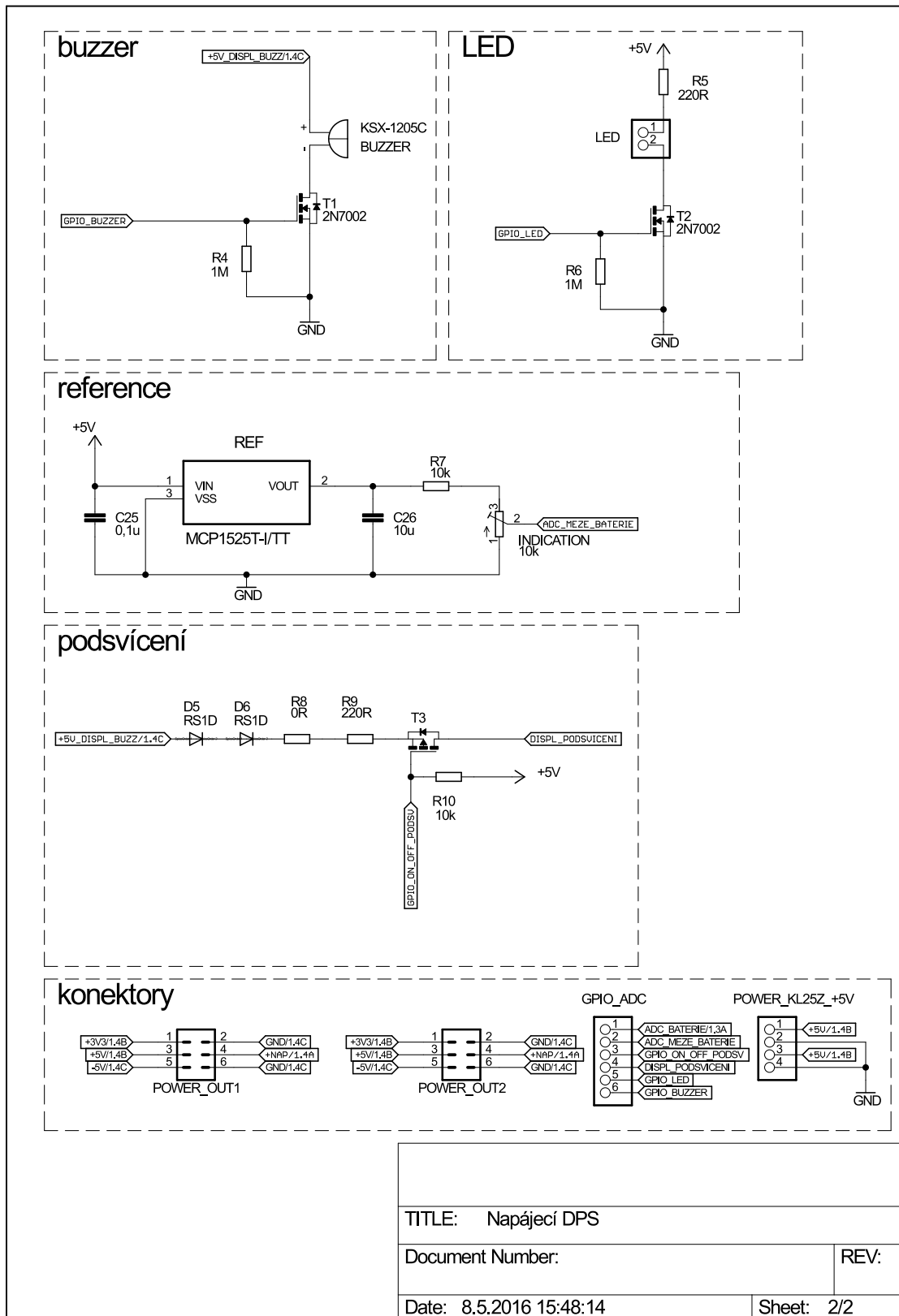
Přílohy

Příloha A – Schéma napájecí části



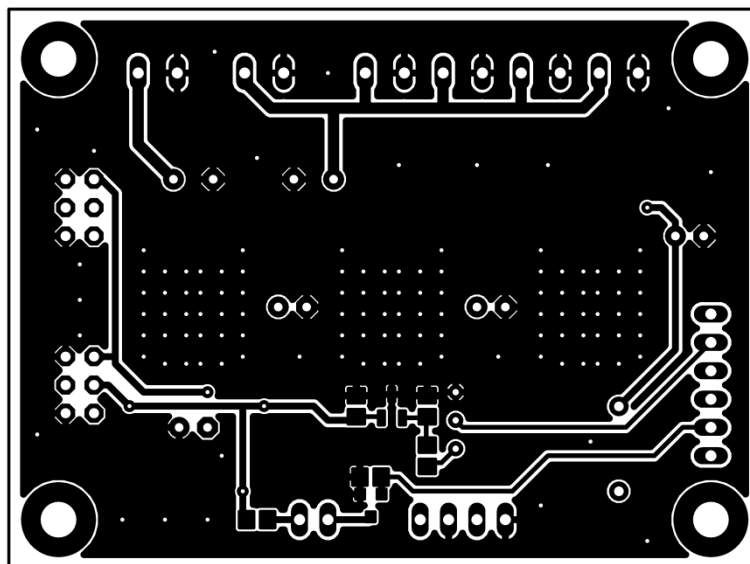
TITLE: Napájecí DPS	
Document Number:	REV:
Date: 8.5.2016 15:48:14	Sheet: 1/2

Obr. A.1 Schéma napájecí části 1/2

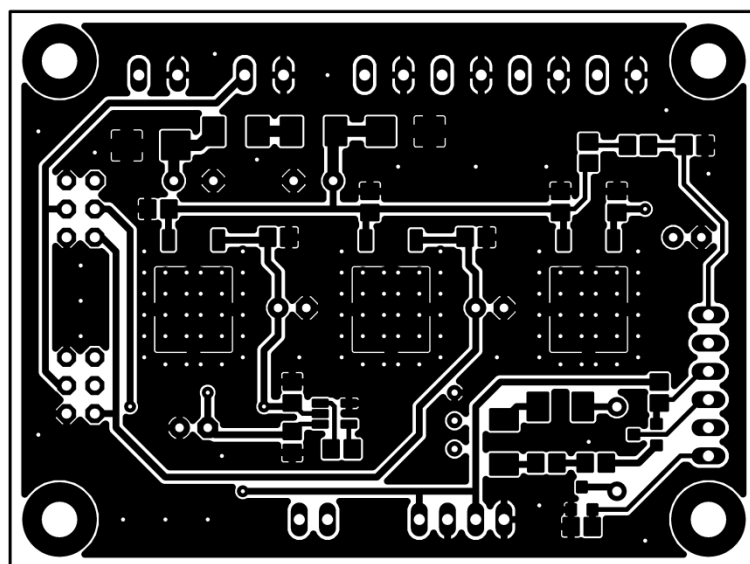


Obr. A.2 Schéma napájecí části1/2

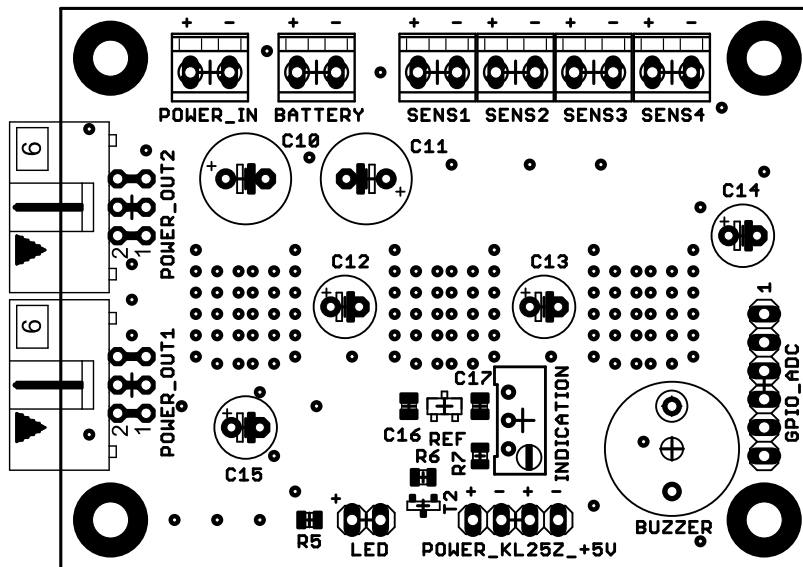
Příloha A – DPS napájecí části (předloha a osazovací výkres)



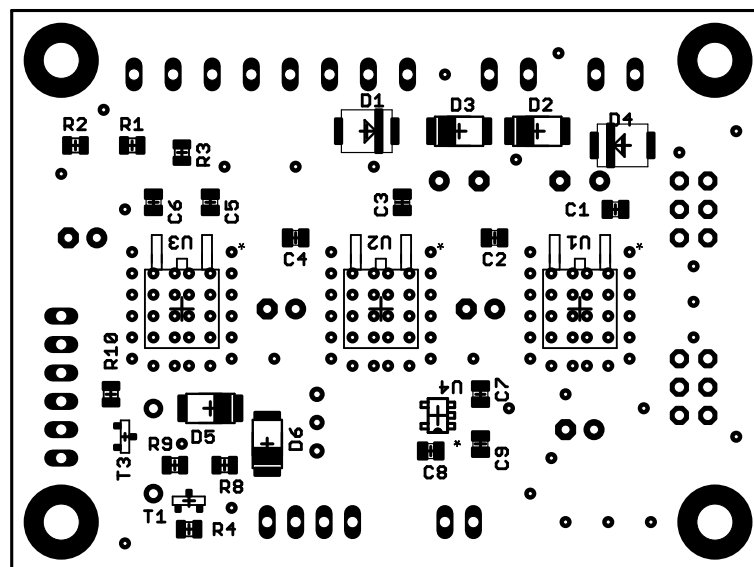
Obr. B.1 Předloha – vrstva TOP



Obr. B.2 Předloha – vrstva BOTTOM

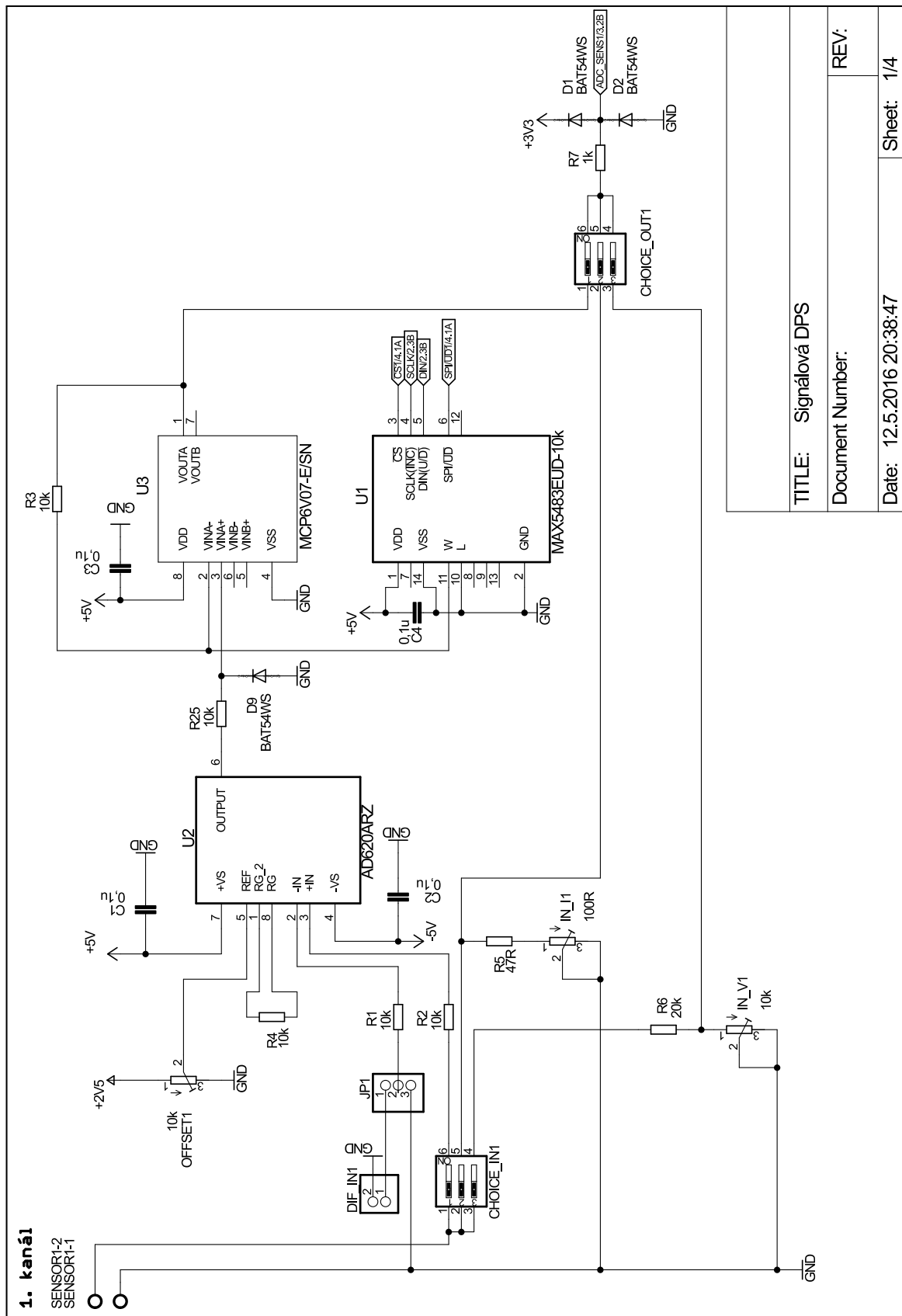


Obr. B.3 Osazovací výkres – vrstva TOP



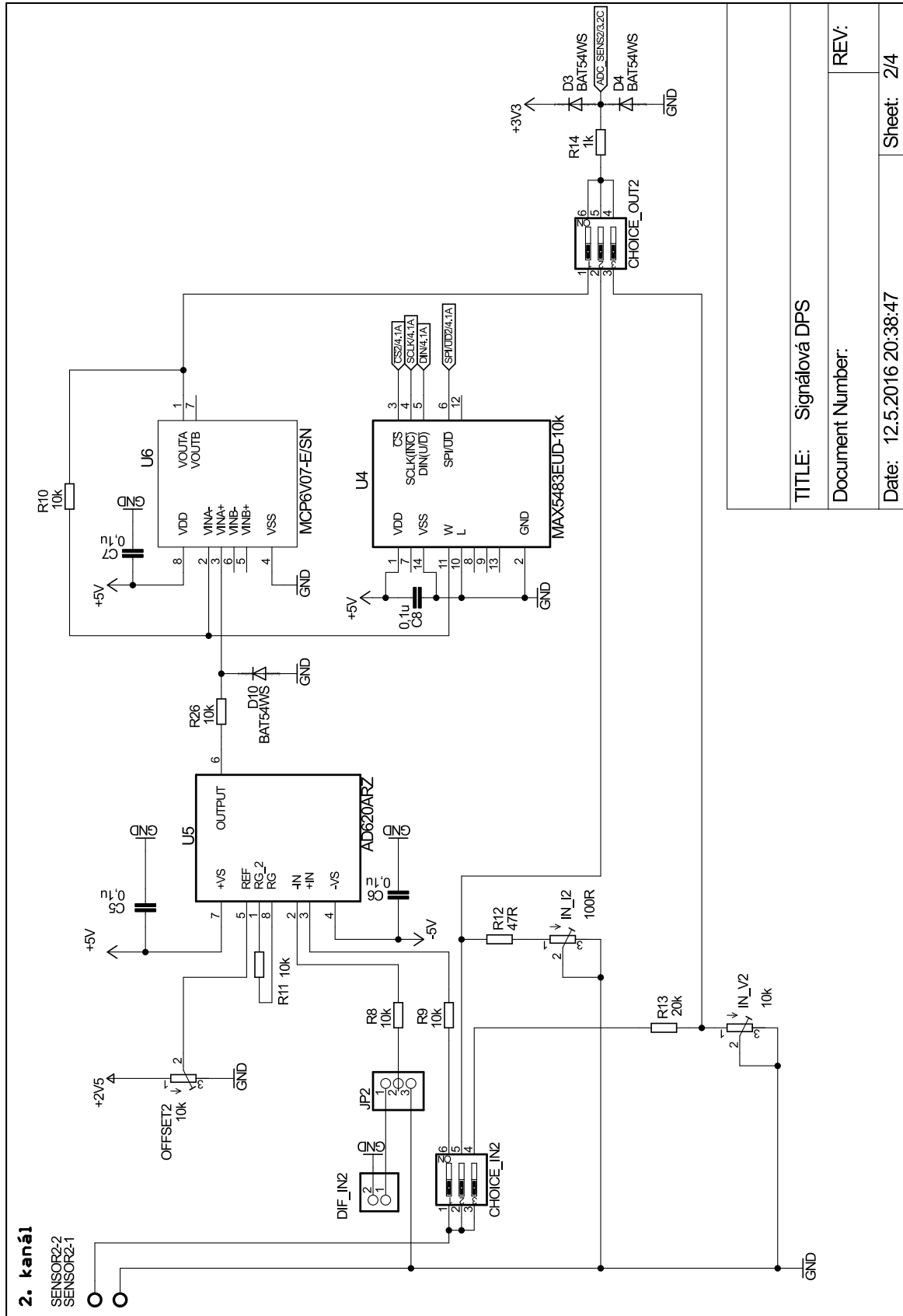
Obr. B.4 Osazovací výkres – vrstva BOTTOM

Příloha B – Schéma signálové části



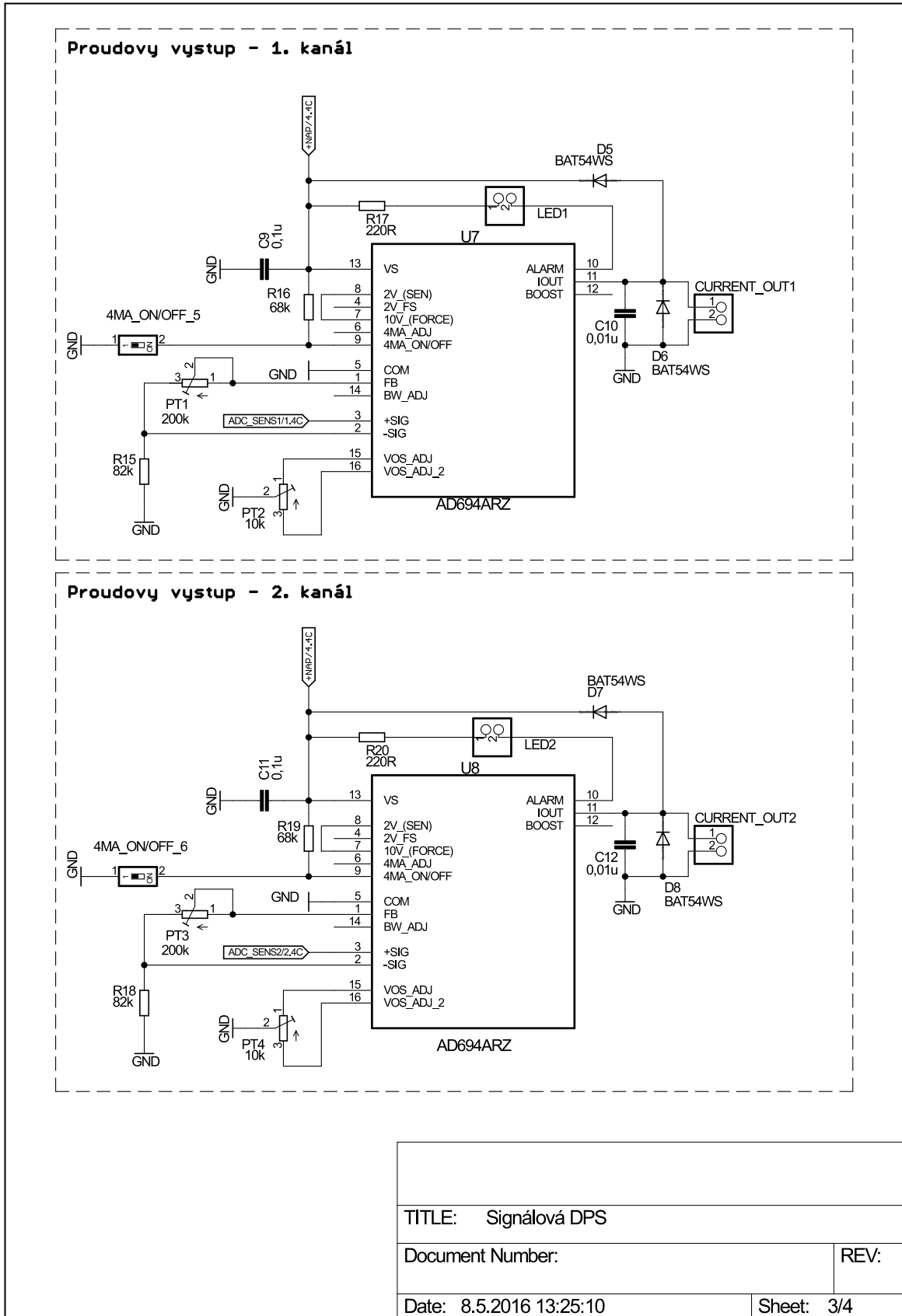
TITLE: Signálová DPS	REV:
Document Number:	
Date: 12.5.2016 20:38:47	Sheet: 1/4

Obr. C.1 Schéma signálové části 1/4

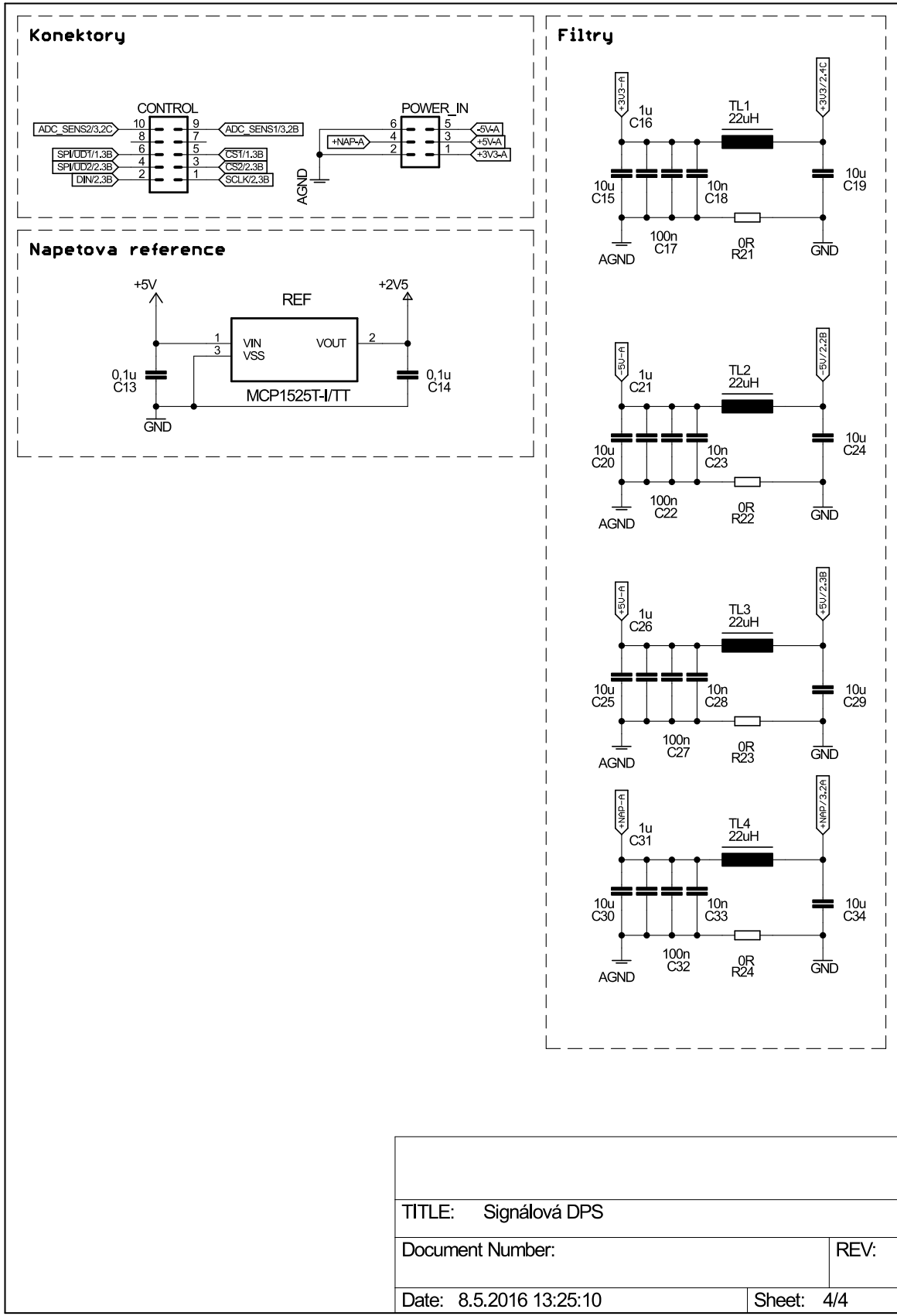


TITLE: Signálová DPS	REV:
Document Number:	
Date: 12.5.2016 20:38:47	Sheet: 2/4

Obr. C.2 Schéma signálové části 2/4

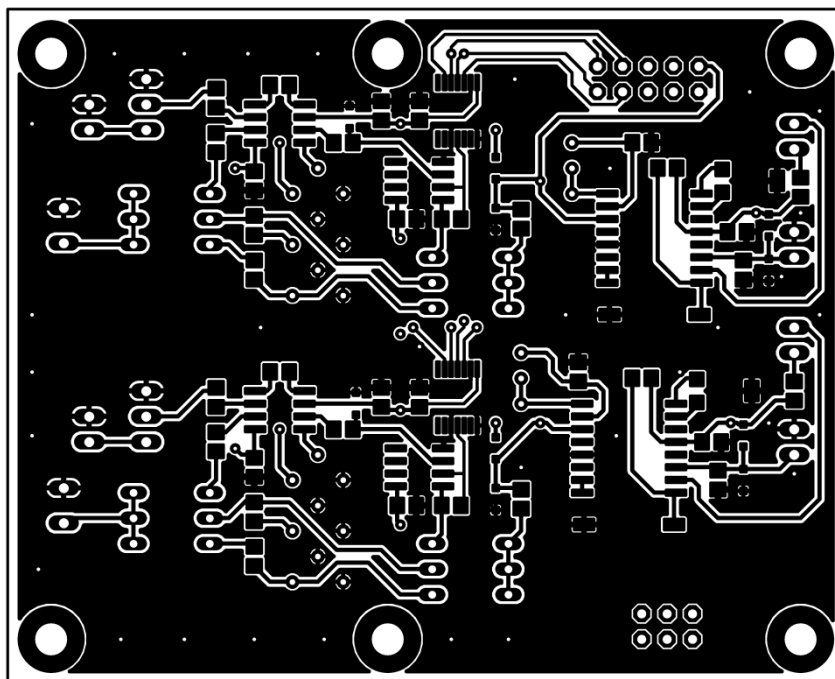


Obr. C.3 Schéma signálové části 3/4

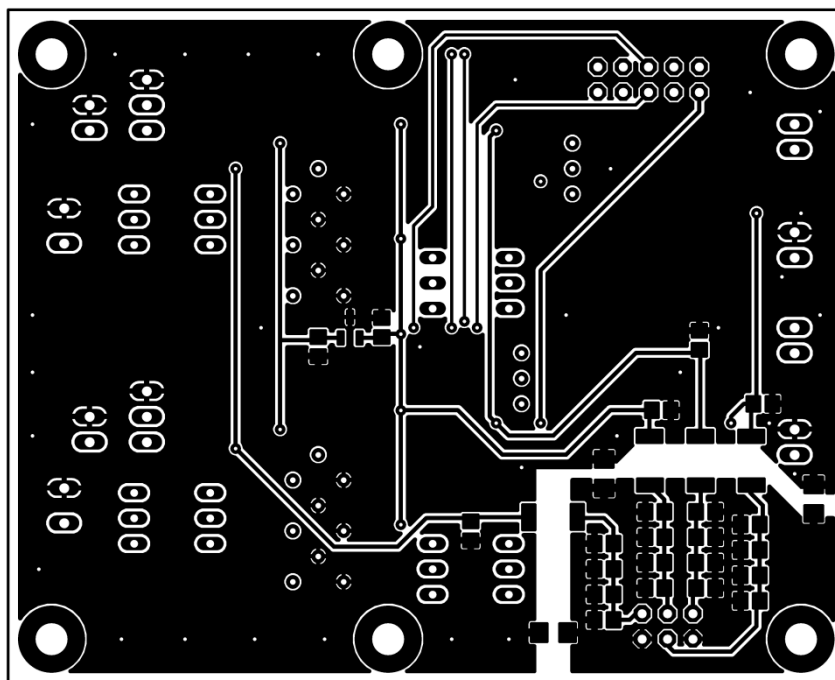


Obr. C.4 Schéma signálové části 4/4

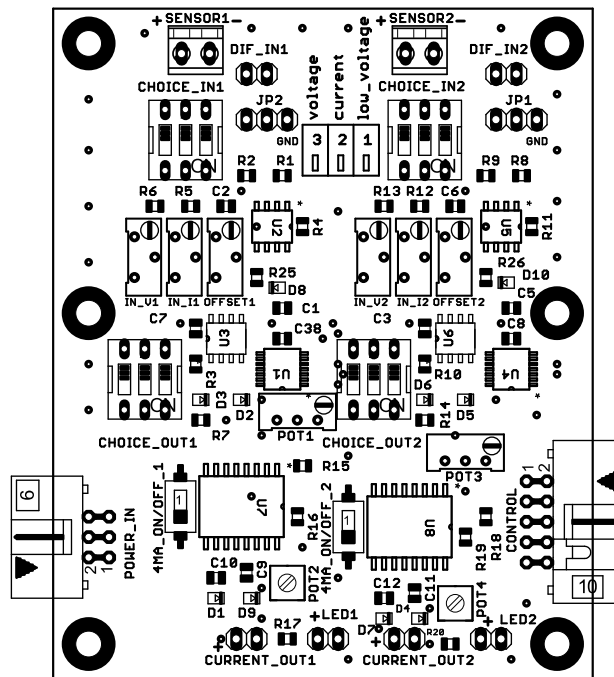
Příloha C – DPS signálové části (předloha a osazovací výkres)



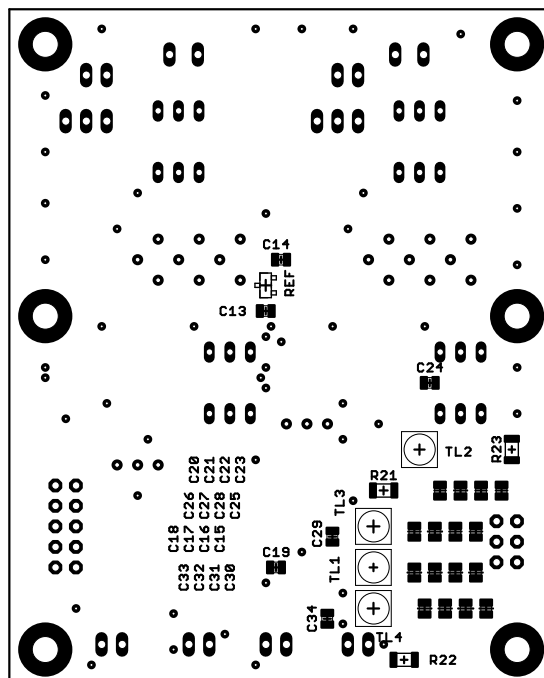
Obr. D.1 Předloha – vrstva TOP



Obr. D.2 Předloha – vrstva BOTTOM

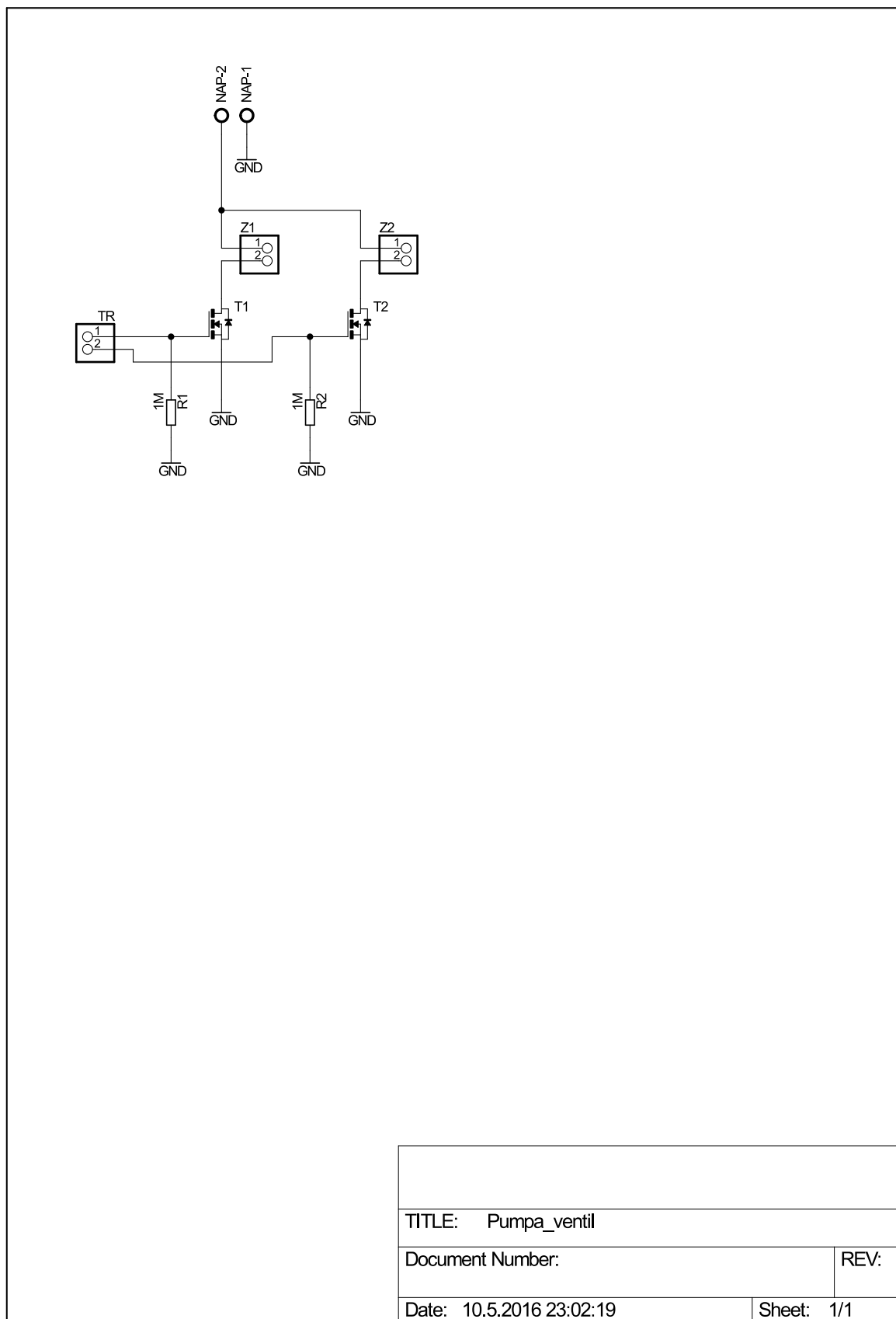


Obr. D.3 Osazovací výkres – vrstva TOP



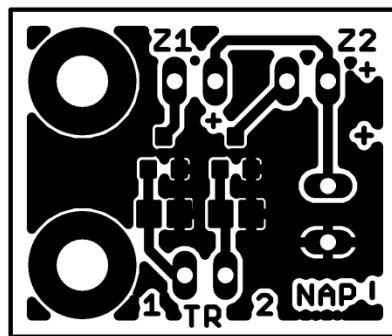
Obr. D.4 Osazovací výkres – vrstva BOTTOM

Příloha D – Schéma spínací DPS

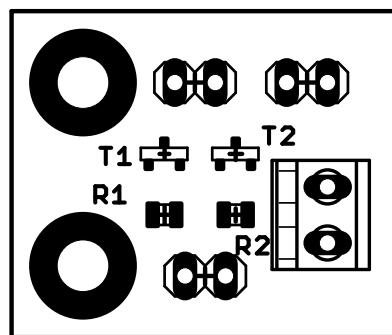


Obr. E.1 Schéma spínací DPS

Příloha E – DPS signálové části (předloha a osazovací výkres)



Obr. F.1 Předloha



Obr. F.2 Osazovací výkres

Příloha F – Seznam součástek

Tab. H.1 Seznam součástek napájecí DPS

Součástky na napájecí DPS		
Součástka:	Hodnota:	Popis:
BATTERY, POWER_IN	AK550	Svorkovnice
BUZZER	KSX-1205C	Magnetická sirénka 85dB
C1, C3, C5	0,33u	SMD keramický kondenzátor 0805
C10, C11	470u/16V	THT elektrolytický kondenzátor, 8 x 11,5 mm
C12, C13, C14, C15	100u/16V	THT elektrolytický kondenzátor, 6 x 11 mm
C17	10u	SMD keramický kondenzátor 0805
C2,C4, C6, C16	0,1u	SMD keramický kondenzátor 0805
C7, C8, C9	1u	SMD keramický kondenzátor 0805
D1, D4	1SMB5930BT3G	Zenerova dioda 16V
D2, D3, D5, D6	RS1D	Schottkyho dioda
GPIO_ADC	BTK06G	Dutinková lišta 1x6
INDICATION	10k	Trimr 10k THT W
LED	BTK02G	Dutinková lišta 1x2
POWER_KL25Z_+5V	BTK04G	Dutinková lišta 1x4
POWER_OUT1, POWER_OUT2	MWL06	Konektor pro ploché kabely
R1	47k	SMD rezistor 0805
R2, R7, R10, R7	10k	SMD rezistor 0805
R3, R8	0R	SMD rezistor 0805
R4, R6	1M	SMD rezistor 0805
R5, R9	220R	SMD rezistor 0805
REF	MCP1525T	Napěťová reference 2,5V, SOT-23
SENS1, SENS2, SENS3, SENS4	AK550	Svorkovnice
T1, T2	2N7002	N-MOSFET tranzistor, SOT-23
U1, U3	LF50CDT-TR	Lineární stabilizátor +5V
U2	LF33CDT	Lineární stabilizátor +3,3V
U4	TPS60403DBVT	Invertující nábojová pumpa -5V

Tab. H.2 Seznam součástek signálové DPS

Součástky na signálové DPS		
Součástka	Hodnota	Popis
C1, C2, C3, C4, C5, C6, C7, C8, C9	0,1u	SMD keramický kondenzátor 0805
C10, C12, C18, C23, C28, C33	10n	SMD keramický kondenzátor 0805
C15, C19, C20, C24, C25, C29, C30, C34	10u	SMD keramický kondenzátor 0805
C16, C21, C16, C31	1u	SMD keramický kondenzátor 0805
C17, C22, C27, C32	100n	SMD keramický kondenzátor 0805
CONTROL	MWL10A	Konektor pro ploché kabely
D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10	BAT54WS	SMD Schottkyho dioda, SOD-323
DIF_IN1, DIF_IN2	S1G02	Oboustranný kolík 1x2
CHOICE_IN1, CHOICE_IN2	DS-03	DIP spínač 03
CHOICE_OUT1, CHOICE_OUT2	DS-03	DIP spínač 03
IN_I1, IN_I2	100R	Trimr 22ot. THT Y
IN_V1, IN_V2	10k	Trimr 23ot. THT Y
JP1, JP2	S1G03	Oboustranný kolík 1x3
LED1, LED2, CURRENT_OUT1, CURRENT_OUT2	BTK02G	Dutinková lišta 1x2
OFFSET1, OFFSET2	10k	Trimr 23ot. THT Y
POWER_IN	MWL06A	Konektor pro ploché kabely
PT1, PT3	200k	Trimr 22ot. THT Y
PT2, PT4	10k	Trimr 1ot. SMD
R1, R2, R3, R4, R8, R9, R10, R11, R25, R26	10k	SMD rezistor 0805
R15, R18	82k	SMD rezistor 0805
R16, R19	68k	SMD rezistor 0805
R17, R20	220R	SMD rezistor 0805
R21, R22, R23, R24	0R	SMD rezistor 1206
R5, R12	47R	SMD rezistor 0805
R6, R13	20k	SMD rezistor 0805
R7, R14	1k	SMD rezistor 0805
REF	MCP1525T	Napěťová reference 2,5V, SOT-23
SENZOR1 SENZOR2	AK550	Svorkovnice
TL1, TL2, TL3, TL4	SMT43 22uH	SMD tlumivka
U1, U4	MAX5483EUD	Digitální potenciometr, TSSOP
U2, U5	AD620ARZ	Přístrojový zesilovač, SOIC-8
U3, U6	MCP6V07	Operační zesilovač, SOIC-8
U7, U8	AD694ARZ	Vysílač proudu

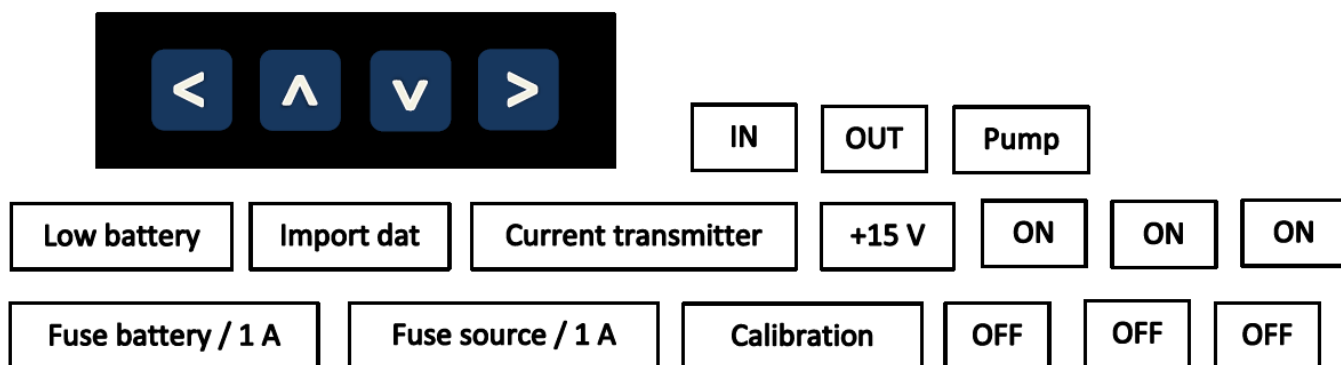
Tab. H.3 Seznam součástek spínací DPS

Součástky na spínací DPS		
Součástka:	Hodnota:	Popis:
NAP	AK550	Svorkovnice
R1, R2	1M	SMD rezistor 0805
T1, T2	2N7002	N-MOSFET tranzistor, SOT-23
Z1, Z2, TR	BTK02G	Dutinková lišta 1x2

Tab. H. 4 Seznam součástek mimo DPS, Konstrukční prvky, kabely

Součástky mimo DPS, konstrukční prvky, kabely		
Součástka	Hodnota	Počet kusů (metry)
3-CESTNÝ VENTIL	XP-513V	1 ks
DISTANČNÍ SLOUPEK, M3, 10 mm	HTS-310	4 ks
DISTANČNÍ SLOUPEK, M3, 20 mm	HTS-320	4 ks
DRŽÁK LED DIODY DO PANELU, 5mm	EBFI3CHROM	1 ks
HLINÍKOVÁ PŘÍSTROJOVÁ KRABIČKA	U-16-6, 85x285x240mm	1 ks
KABEL USB MINI		0,5 m
KOLÉBKOVÝ SPÍNAČ, 15X21mm	H8553VB BLK/GREEN CL076	1 ks
KONEKTOR NA KABEL, FAST-ON, FEMALE, 4,8 mm	FH48X08M1	10 ks
KONEKTOR NA PLOCHÉ KABELY, FEMALE, 2X3	PFL06	2 ks
KONEKTOR NA PLOCHÉ KABELY, FEMALE, 2X5	PFL10	1 ks
KONEKTOR USB A DO PANELU	MUSBR-A511-M0	1 ks
LCD DISPLEJ, 4 X 20 ZNAKŮ	MIDAS MC42004A6W	1 ks
LED DIODA, 5 mm, RED	OSR6LU5121A-KL	1 ks
MEMBRÁNOVÁ KÁVESNICE 1X4		1 ks
OLOVĚNÝ AKUMULÁTOR	NERBO ACCU-HP2.2-12	1 ks
POJISTKOVÉ POUZDRO, 5X20mm, F-POJISTKA	FPG1-S	2 ks
PUMPA	CM-50-24A	1 ks
SIGNÁLOVÝ KONEKTOR CAN9	CAN 9 A Z	1 ks
SILIKONOVÁ HADIČKA, 4 mm		2 m
SÍŤOVÝ KABEL, 1X0,5 MM, BLACK	BL-CYA 1x 0,5	1 m
SÍŤOVÝ KABEL, 1X0,5 MM, RED	RG-CYA 1x 0,5	1 m
SMRŠŤOVACÍ BUŽÍRKA, PVC	RC 1.5/2	0,5 m
SMRŠŤOVACÍ BUŽÍRKA, PVC	RC 1.0/0	0,5 m
SOUOSÝ NAPÁJECÍ KONEKTOR, FEMALE, 5,5/2,1mm	PC-GM2.1	1 ks
SOUOSÝ NAPÁJECÍ KONEKTOR, MALE, 5,5/2,1mm	HS21	1 ks
ŠROUBKY M3, MATKY		50 ks
VÝVOJOVÝ KIT	FRDM-KL25Z	1 ks

Příloha G – Předloha pro popis panelů



Gas analyser Gas analyser **Gas analyser**

Obr. I.1 Předloha pro popis panelů

Příloha H – Výsledná podoba konstrukce – vnější pohled

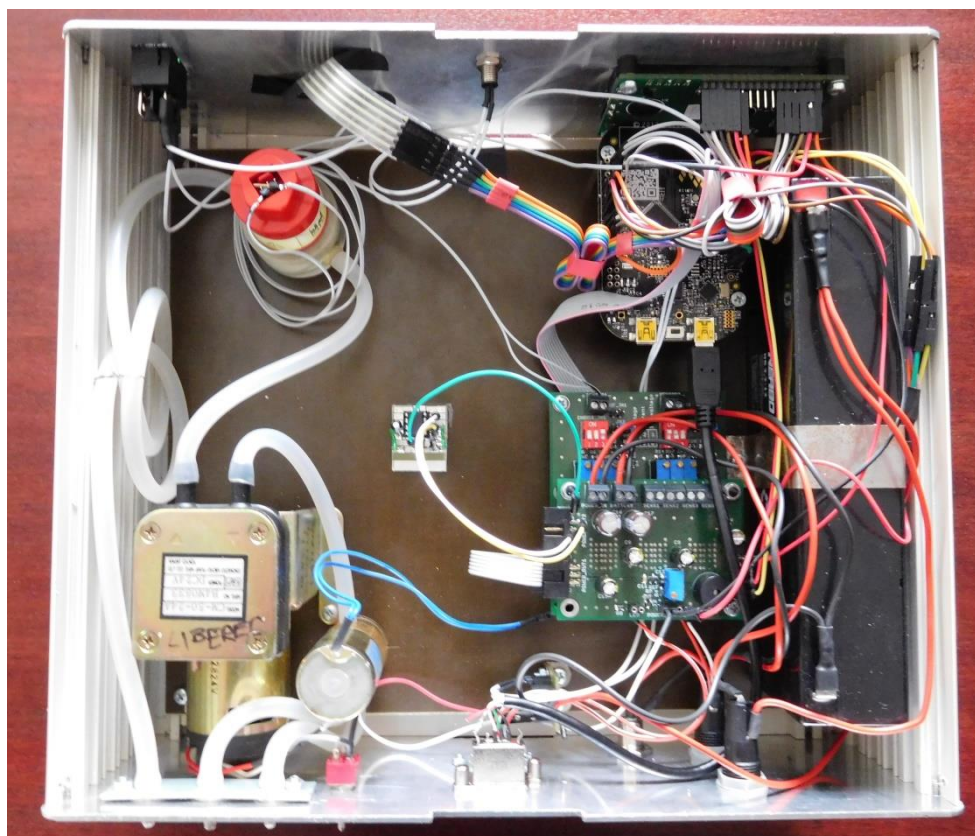


Obr. J.1 Pohled z přední strany

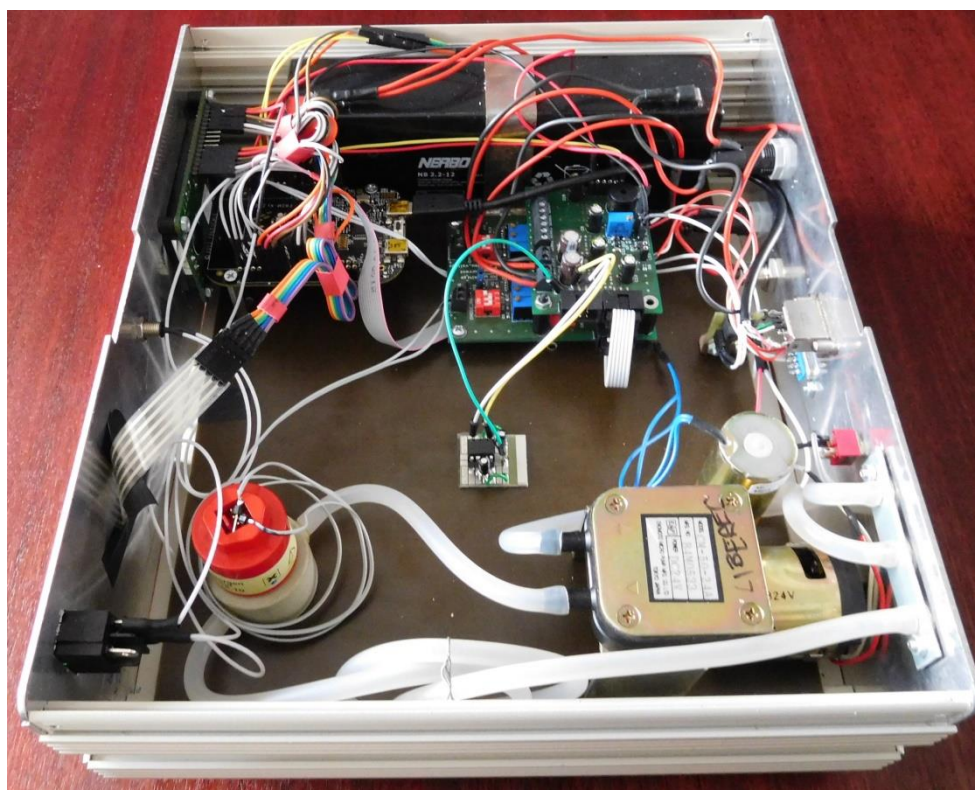


Obr. J. 2 Pohled ze zadní strany

Příloha I – Výsledná podoba konstrukce – vnitřní uspořádání



Obr. K.1 Pohled shora



Obr. K.2 Pohled z úhlu

Příloha J – CD – Software

Přílohou je CD obsahující firmware a kompletní verzi této diplomové práce včetně veškeré dokumentace v elektronické podobě.