



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektronická vyhodnocovací jednotka pro vakuovou měрку

Autor práce: Jaroslav Bečka
Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Freisleben

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav BEČKA**
Osobní číslo: **E10B0281P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Elektronická vyhodnocovací jednotka pro vakuovou měрку**
Zadávací 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 :

1. Popište možnosti měření tlaku pro potřeby vakuových depozičních procesů v elektrotechnice.
2. Popište vakuovou měрку PFEIFFER PKR 251 a využití principy měření tlaku.
3. Navrhněte a realizujte obvodové řešení s mikrokontrolérem k ovládání vyhodnocovací jednotky.
4. Vytvořte řídicí software vyhodnocovací jednotky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

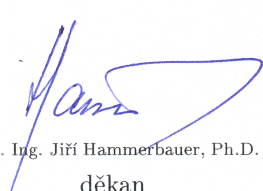
1. **Mattox, D.M.: Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing, Second edition 2010, Elsevier.**
2. **Burkhard, M.: C pro mikrokontroléry**
3. **Pinker, J.: Mikroprocesory a mikropočítače**
4. **Firemní literatura a katalogy výrobců zvolených součástek a obvodů**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Freisleben**
Katedra technologií a měření

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jaroslav Freisleben**
Katedra technologií a měření

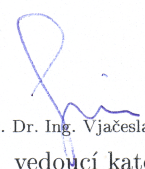
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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



L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato práce se zabývá konstrukcí vyhodnocovací jednotky pro vakuovou měрку. V první části jsou vysvětleny obecné pojmy z oblasti tlaku a vakua. Jsou zde rovněž zmíněny používané jednotky tlaku. Dále jsou rozebírány způsoby vytváření tenkých vrstev s důrazem na fyzikální depozici z plynné fáze. Další část je zaměřena na různé principy měření vakua. Poté je popsána vakuová měřka Pfeiffer PKR 251. Hlavní částí práce je popis konstrukce, schématu zapojení, mikrokontroléru a principu funkce vyhodnocovací jednotky.

Klíčová slova

vakuum, vakuová měřka, fyzikální depozice z plynné fáze, měření tlaku, vyhodnocovací jednotka

Abstract

Bečka, Jaroslav. *Electronic Evaluation Unit for Vacuum Gauge* [*Elektronická vyhodnocovací jednotka pro vakuovou měrku*]. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jaroslav Freisleben

This work deals with the construction of evaluation unit for vacuum gauge. In the first section there are explained general concepts from the field of pressure and vacuum. There are also mentioned commonly used pressure units. Next, thin film methods are discussed with an emphasis on physical vapour deposition. Another section is focused on different principles of vacuum measurement. Then the Pfeiffer PKR 251 vacuum gauge is described. The main part is the description of construction, circuit diagram, microcontroller and the function principle of evaluation unit.

Keywords

vacuum, vacuum gauge, physical vapor deposition, pressure measurement, evaluation unit

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6. června 2013

Jaroslav Bečka

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratk	x
1 Úvod	1
2 Tlak	2
2.1 Atmosférický tlak	2
2.2 Podtlak a přetlak	2
2.3 Jednotky tlaku	3
2.4 Definice vakua	4
2.5 Střední volná dráha molekul	5
2.6 Získávání vakua	5
2.7 Využití vakua	6
3 Tenké vrstvy a jejich nanášení	7
3.1 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)	8
3.1.1 CVD iniciované plazmou	8
3.2 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)	8
3.2.1 Vakuové napařování	9
3.2.2 Naprašování	10
3.2.3 Obloukové vypařování	11
3.2.4 Iontové plátování	11
4 Možnosti měření tlaku pro potřeby vakuových depozičních procesů v elektrotechnice	13
4.1 Mechanické (deformační) tlakoměry	14
4.1.1 Bourdonova trubice	14
4.1.2 Membránové vakuometry	14
4.1.3 Kapacitní membránový vakuoměr	15
4.1.4 Snímače s odporovými tenzometry	16

4.2	Vakuometry založené na přenosu impulzu	17
4.2.1	Langmuirův-Dushmanův vakuometr	17
4.3	Tepelné vakuometry	18
4.3.1	Odporový (Piraniho) vakuometr	18
4.3.2	Termočláňkový tepelný vakuometr	20
4.3.3	Další druhy tepelných vakuometrů	21
4.4	Ionizační vakuometr se žhavenou katodou	21
4.4.1	Bayardův - Alpertův ionizační vakuometr	24
4.5	Výbojové vakuometry	26
4.5.1	Ionizační vakuometr se studenou katodou	26
4.5.1.1	Penningův (magnetronový) vakuometr	26
4.5.1.2	Inverzní magnetronový vakuometr	27
5	Vakuová měřka Pfeiffer PKR 251	30
6	Konstrukce vyhodnocovací jednotky	33
6.1	Schéma zapojení	33
6.1.1	Napájecí obvod	33
6.1.2	Komunikace s LCD displejem	34
6.1.3	Připojení vakuové měřky Pfeiffer PKR 251	35
6.1.4	Popis ostatních částí schématu	36
6.2	Použitý mikrokontrolér ATmega16	36
6.2.1	Základní vlastnosti	37
6.2.2	Naprogramování mikrokontroléru	37
6.2.3	A/D převodník	38
6.2.3.1	Základní parametry A/D převodníku	38
6.2.3.2	Popis činnosti A/D převodníku, řídicích registrů a jejich nastavení	39
6.3	Realizace plošného spoje	43
6.4	Princip funkce vyhodnocovací jednotky	43
7	Závěr	45
	Reference, použitá literatura	47
	Přílohy	50
A	Schéma zapojení	50
B	Deska plošného spoje	52
C	Fotografie realizované vyhodnocovací jednotky	54

D Partlist	55
E Zdrojové kódy	57
E.1 Hlavní program	57
E.2 Hlavička knihovny pro práci s LCD	58
E.3 Knihovna pro práci s LCD	59

Seznam obrázků

3.1	Znázornění průběhů procesů PVD a CVD [Převzato z [14]]	7
3.2	Schématické znázornění různých PVD procesů [Převzato z [17]] (A) vakuové napařování, (B) plazmové napařování, (C) vakuové napařování, (D) iontové plátování s termálním zdrojem, (E) iontové plátování s obloukovým zdrojem, (F) depozice za asistence iontového paprsku, (G) napařování s rovnovážným magnetronem, (H) napařování s nerovnovážným magnetronem	9
3.3	Příklady vypařovacích zdrojů používaných při vakuovém napařování [Převzato z [18]]	10
4.1	Schématické znázornění vakuometru s Bourdonovou trubicí [Převzato s úpravami z [4]]	14
4.2	Různé profily kruhových membrán [Převzato z [4]]	15
4.3	Funkční schéma kapacitního membránového vakuometru [Převzato z [4]] H - hlavice, V - ventil, p_r - referenční tlak, p_n - měřený tlak, I - indikační přístroj, Z - zdroj	16
4.4	Příklad skutečného provedení kapacitního membránového vakuoměru [Převzato z [20]]	16
4.5	Schématické znázornění Langmuirova-Dushmanova vakuometru [Převzato s úpravami z [4]]	18
4.6	Schématické znázornění Piraniho vakuometru [Převzato z [4]] r' - poloměr přívodů, l' - délka přívodů, r - poloměr odporového vlákna, l - délka odporového vlákna	19
4.7	Schéma zapojení Piraniho vakuometru do Wheatstonova můstku [Převzato z [4]]	19
4.8	Závislost teploty vyhřívaného vlákna na tlaku [Převzato z [4]]	21
4.9	Schématické znázornění dilatačního tepelného vakuometru s bimetalovou spirálou [Převzato s úpravami z [4]]	22
4.10	Schématické znázornění ionizačního vakuometru se žhavenou katodou [Převzato s úpravami z [4]]	22
4.11	Ionizační vakuometr se žhavenou katodou s vyměněnou funkcí elektrod [Převzato s úpravami z [4]]	23
4.12	Pravděpodobnost ionizace [Převzato z [4]]	24

4.13	Schématické znázornění a skutečné provedení Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru	25
4.14	Další varianta provedení Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru Převzato z [20] 	25
4.15	Schématické znázornění Penningova vakuometru (a) a různé modifikace konstrukčního uspořádání (b, c, d) Převzato z [4] 	26
4.16	Schématické znázornění a skutečné provedení inverzního magnetronového vakuometru	28
4.17	Schématické znázornění výbojového vakuometru s více komorami Převzato z [4] 	28
5.1	Závislost tlaku na výstupním napětí Převzato s úpravami z [12] 	31
5.2	Závislost naměřeného tlaku na tlaku efektivním v měřícím rozsahu nad 10^{-2} mbar (aktivní je jen obvod s Piraniho vakuometrem) Převzato z [12] .	32
5.3	Závislost naměřeného tlaku na tlaku efektivním v měřícím rozsahu od 10^{-6} do 0,1 mbar Převzato z [12] 	32
6.1	Napájecí obvod	34
6.2	Schéma připojení LCD displeje k mikrokontroléru	35
6.3	Elektrické zapojení uvnitř měřky a popis vývodů konektoru Převzato s úpravami z [12] 	36
6.4	Schéma připojení vakuové měřky k mikrokontroléru	37
6.5	Rozložení vývodů mikrokontroléru ATmega16 v pouzdře DIP Převzato z [3]	38
6.6	Zapojení ISP konektoru	38
6.7	Blokové schéma A/D převodníku Převzato z [7] 	39
6.8	Řídící registr ADMUX Převzato z [7] 	39
6.9	Předdělička pro A/D převodník Převzato z [7] 	41
6.10	Řídící registr ADCSRA Převzato z [7] 	41
6.11	Doporučená realizace připojení A/D převodníku Převzato z [3] 	42
6.12	Řídící registry ADCH a ADCL (ADLAR = 0) Převzato z [7] 	42
6.13	Vývojový diagram	44
A.1	Schéma zapojení elektronické vyhodnocovací jednotky	51
B.1	Deska plošného spoje elektronické vyhodnocovací jednotky - horní strana .	52
B.2	Deska plošného spoje elektronické vyhodnocovací jednotky - spodní strana	52
B.3	Osazovací výkres - horní strana desky	53
B.4	Osazovací výkres - spodní strana desky	53
C.1	Fotografie přední strany vyhodnocovací jednotky	54
C.2	Fotografie zadní strany vyhodnocovací jednotky	54

Seznam tabulek

2.1	Konverzní tabulka jednotek tlaku Převzato z [1] 	3
2.2	Kolizní průměr σ pro některé plyny Převzato s úpravami z [2]	5
5.1	Hodnoty konstanty d ze vztahu (5.1) pro nejčastěji používané jednotky tlaku Převzato z [12] 	31
5.2	Hodnoty konstanty K ze vztahu (5.2) pro různé plyny Převzato z [12] . . .	31
6.1	Zapojení vývodů displeje MC1602E-SYL/H Převzato z [11] 	35
6.2	Výběr referenčního napětí A/D převodníku Převzato z [3] 	40
6.3	Výběr SE kanálu A/D převodníku Převzato z [3] 	40
D.1	Partlist	56

Seznam symbolů a zkratek

p_0, p_n	Normální atmosférický tlak (101 325 [Pa]).
g_n	Tíhové zrychlení (9, 80655 [$m \cdot s^{-2}$]).
p_{abs}	Absolutní tlak [Pa].
s.š.	Severní šířky.
HV	High Vacuum. Vysoké vakuum.
UHV	Ultra-High Vacuum. Ultravysoké vakuum.
XHV	Extra-High Vacuum. Extrémně vysoké vakuum.
λ	Mean Free Path. Střední volná dráha [m].
R	Univerzální plynová konstanta (8, 3144621 [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]).
N_A	Avogadrova konstanta ($6, 022141 \cdot 10^{23}$ [mol^{-1}]).
σ	Kolizní průměr molekuly [m].
CRT	Cathode Ray Tube. Katodová trubice.
PVD	Physical Vapor Deposition. Fyzikální depozice z plynné fáze.
CVD	Chemical Vapor Deposition. Chemická depozice z plynné fáze.
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition. Chemická depozice z plynné fáze inicovaná plazmou.
EBPVD	Electron Beam Physical Vapor Deposition. Fyzikální depozice z plynné fáze za asistence elektronového paprsku.
Arc-PVD	Arc Vapor Deposition. Obloukové vypařování.
IAD	Ion Assisted Deposition. Iontové plátování.
IVD	Ion Vapor Deposition. Iontové plátování.
IBAD	Ion Beam Assisted Deposition. Depozice za asistence iontového paprsku.
LCD	Liquid Crystal Display. Displej z tekutých krystalů.
LED	Light Emitting Diode. Dioda emitující světlo.
DPS	Deska plošného spoje.
RS	Register Select. Řídící pin LCD - výběr registru.
R/\overline{W}	Read/Write. Řídící pin LCD - čtení/zápis.
E	Enable. Řídící pin LCD - povolovací.
DDRAM	Display Data Random Access Memory. Datová paměť displeje.
MSB	Most Significant Bit. Nejvýznamnější bit.
LSB	Least Significant Bit. Nejméně významný bit.

SMD	Surface Mount Device. Součástka pro povrchovou montáž.
RISC	Reduced Instruction Set. Počítač s redukovanou instrukční sadou.
MIPS	Milion Instruction Per Second. Milion instrukcí za sekundu.
Flash	Elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem.
RAM	Random Access Memory. Paměť dat.
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory. Elektricky mazatelná paměť typu ROM.
ISP	In System Programming. Programování přímo v aplikaci.
SPI	Serial Pheripheral Interface. Sériové periferní rozhraní.
JTAG	Joint Test Action Group. Architektura pro testování plošných spojů, programování flash pamětí apod.
GPR	General Purpose Register. Univerzální registr.
PWM	Pulse-Width Modulation. Pulzně šířková modulace.
USART	Universal Serial Asynchronous Receiver-Transmitter. Univerzální sériový asynchronní přijímač-vysílač.
TWI	Two Wire Interface. Dvou vodičové sériové rozhraní.
DIP	Dual In-line Package. Pouzdro s dvěma řadami pinů.
TQFP	Thin Quad Flat Pack. Tenké pouzdro s vývody do všech stran.
MLF	Micro-Leadframe. Tenké pouzdro s vývody do všech stran bez klasických pinů.
GND	Ground. Zem.
AGND	Analog Ground. Analogová zem.
kSPS	Kilo Sample Per Second. Tisíc vzorků za vteřinu.
SE	Single-Ended. Kanál A/D převodníku měřící napětí proti zemi.
ADMUX	ADC Converter Multiplexer Select Register. Multiplexovací registr A/D převodníku.
ADSCRA	ADC Status and Control Register. Stavový a kontrolní registr A/D převodníku.
ADCL	ADC Data Register Low. Dolní registr pro uložení výsledku převodu.
ADCH	ADC Data Register High. Horní registr pro uložení výsledku převodu.
ADEN	ADC Enable. Bit povolující činnost A/D převodníku.

1

Úvod

Vakuová technika je nedílně spojena jak s naším každodenním životem, tak se špičkovým výzkumem a výrobou ve všech oblastech průmyslu (kosmický výzkum, nové materiály a technologické procesy, plazmové technologie). Rozvoj vakuové techniky a fyziky pokračuje i v současné době. Různé aplikace vyžadují odlišnou velikost vakua a mají rozdílné nároky na přesnost jeho měření. Pro měření jeho velikosti se používají vakuové měrky využívající rozličných principů. Ke zpracování signálů z těchto měrek se používají vyhodnocovací jednotky, jejichž primární funkcí je napájet měrku a zobrazovat naměřené hodnoty tlaku. Dokáží však ve spojení s měrkou i indikovat různé chyby či poškození. Tato práce se zabývá návrhem a realizací vyhodnocovací jednotky pro vakuovou měrku Pfeiffer PKR 251.

První část práce se věnuje tlaku obecně. Je zde zmíněno, co je to atmosférický tlak, vysvětlení pojmů přetlak a podtlak, střední volná dráha. Dále je zde řešena otázka vakua, jeho využití a rozdělení.

Druhá část se věnuje jedné z velice důležitých oblastí využití vakua a to nanášení tenkých vrstev. V dnešní době existuje pro jejich vytváření mnoho různých metod. Se spoustou z nich je schopnost vytváření vysokého vakua a jeho přesného měření nedílně spojena.

Ve třetí části jsou popsány principy měření vakua pro možnosti vakuových depozičních procesů v elektrotechnice. V jednotlivých kapitolách jsou probírány různé druhy vakuometrů, jejich principy, měřicí rozsahy, výhody a nevýhody jejich použití.

Vakuová měrka Pfeiffer PKR 251 je detailně popsána ve čtvrté části. Jsou zmíněny měřicí principy, způsob, jakým lze z výstupního signálu měrky dopočítat hodnotu tlaku, je zde řešena závislost na druhu měřeného plynu.

Pátá část se zabývá samotným řešením návrhu a konstrukce vyhodnocovací jednotky. Jsou zde podrobně popsány důležité části schématu, použitý LCD displej a komunikace s ním. Dále je v této kapitole popsán použitý mikrokontrolér a jeho základní vlastnosti. Zvláštní důraz je zde kladen na popis činnosti A/D převodníku, řídicích registrů a jejich nastavení. V závěru je uveden vývojový diagram, podle něhož byl mikroprocesor naprogramován.

2

Tlak

V této kapitole jsou vysvětleny pojmy atmosférický tlak, podtlak, přetlak, vakuum a střední volná dráha. Jsou zde popsány používané jednotky tlaku a vztahy mezi nimi. V závěru je popsáno využití vakua v různých oblastech technické či experimentální praxe.

2.1 Atmosférický tlak

Celou Zemi obklopuje vzdušný obal – atmosféra - dosahující do výše několika set kilometrů. Atmosféra obsahuje směs různých plynů (dusík, kyslík, argon a další), vodní páry, pevné a kapalné částice. Atmosférický tlak je dán hmotností vzduchu, kterou působí na zemský povrch vlivem gravitačního pole Země. Sloupec vzduchu o průřezu 1 m^2 vyvíjí na zemi tlak rovnající se hmotnosti přibližně 10 000 kg. Hodnota atmosférického tlaku závisí na nadmořské výšce, velikosti tíhového zrychlení, mocnosti, teplotě a hustotě atmosféry v daném místě. Nejedná se tedy o konstantní hodnotu. Jelikož se stoupající nadmořskou výškou vzduch řídne, snižuje se i atmosférický tlak a to vždy o 1% na každých 100 m výšky až do nadmořské výšky 2 000 km. Na vrcholu hory Mount Everest, jejíž výška činí 8 848 m, dosahuje atmosférický tlak hodnoty 33 000 Pa. Z důvodu snazšího porovnávání výsledků různých měření atmosférického tlaku, byl zaveden tzv. normální tlak vzduchu (normální atmosférický tlak) p_n či p_0 . Byl definován jako průměrná hodnota tlaku vzduchu při mořské hladině na 40° s.š., při teplotě 15°C a tíhovém zrychlení $g_n = 9,80655 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [1, 2, 23].

$$p_n = 101\,325 \text{ Pa} = 1013,15 \text{ hPa} = 760 \text{ Torr} = 1013 \text{ mbar} \quad (2.1)$$

2.2 Podtlak a přetlak

Fyzikálně existuje jen jeden druh tlaku, který je vztažen k hranici absolutního vakua (vychází z nulové hodnoty). Označujeme ho jako tlak absolutní p_{abs} . Obvykle se však udávané tlaky vztahují k normálnímu atmosférickému tlaku zmíněnému výše a jedná se tedy o tlaky relativní. Označují se jako podtlak a přetlak. Pojmem podtlak se označuje

taková hodnota tlaku, která dosahuje nižších hodnot, než normální atmosférický tlak. Pro jeho rozlišení od přetlaku se k udávaným hodnotám přidává znaménko minus. Jako přetlak se poté označuje tlak o hodnotě vyšší, než je hodnota normálního atmosférického tlaku [1, 2, 22].

2.3 Jednotky tlaku

Základní jednotkou SI je Pascal, kde:

$$Pa = N \cdot m^{-2} = kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2} \quad (2.2)$$

Je to tlak, který vyvolává síla 1 N, rovnoměrně a spojitě rozložená a působící kolmo na plochu o obsahu 1 m². Hodnotu tlaku lze vyjádřit celou řadou dalších jednotek. Některé z nich jsou v dnešní době již zastaralé a nepoužívají se, lze na ně však narazit při studiu starší technické či odborné literatury. Jiné jsou používány velice často v anglosaské či americké literatuře. Dokonalému vakuu by podle jeho teoretické definice odpovídala nulová hodnota tlaku. Níže uvedená konverzní tabulka udává hodnoty přepočítávacích koeficientů, které je potřeba použít při konverzi na jiné jednotky [1, 2, 5].

	Pa	torr	atm	bar	psi	psf	kp · cm ⁻²
Pa	1	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,4504 \cdot 10^{-4}$	$2,0085 \cdot 10^{-2}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$
torr	133,322	1	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,9337 \cdot 10^{-2}$	2,7844	$1,3594 \cdot 10^{-3}$
atm	$1,01325 \cdot 10^5$	760	1	1,01325	14,69595	2116,11	1,033227
bar	$1 \cdot 10^5$	750,06	0,98692	1	14,5038	2088,5	1,0197
psi	6894,76	51,715	0,068046	0,068948	1	144	10,070306
psf	47,88	0,35913	$4,7254 \cdot 10^{-4}$	$4,788 \cdot 10^{-4}$	$6,9444 \cdot 10^{-3}$	1	$4,882 \cdot 10^{-4}$
kp · cm ⁻²	98067	735,58	0,9678	0,98067	14,223	2048,3	1

Tab. 2.1: Konverzní tabulka jednotek tlaku | Převzato z [1]

Poznámky k tabulce: g je symbol pro gravitační zrychlení (závisí na zeměpisné poloze a nadmořské výšce).

- **torr** je hydrostatický tlak jednoho milimetru rtuťového sloupce na hladině moře při 0 °C
- **atm** je fyzikální atmosféra, vychází ze standardního tlaku atmosférického vzduchu
- **kilopond** na centimetr čtvereční tzv. technická atmosféra (at), odpovídá tlaku $g \cdot kg \cdot cm^{-2}$ na hladině moře
- **psi** (z angl. pound per square inch) je libra na čtvereční palec, odpovídá tlaku $g \cdot lb \cdot in^{-2}$ na hladině moře (lb = 0.45359237 kg, in = 0.0254 m)

- **psf** (z angl. per square foot) je libra na čtvereční stopu, odpovídá tlaku $g \cdot lb \cdot ft^{-2}$ na hladině moře ($lb = 0.45359237 \text{ kg}$, $ft = 0.3048 \text{ m}$)

V americké literatuře se často vyskytují následující symboly:

psia – psi absolutní, tedy vztaženo k absolutnímu vakuu

psid – psi diferenciální, tlakový rozdíl mezi dvěma místy

psig – psi gauge (přístrojový), vztaženo k tlaku okolního vzduchu

psis – psi standardní, vztaženo ke standardnímu tlaku vzduchu na hladině moře

14.7 psi

2.4 Definice vakua

Termín vakuum pochází z latinského *vacuus*, což znamená prázdný. V ideálním případě označuje tento termín takový fyzikální stav, v němž není v daném prostoru přítomná žádná částice, a to jak hmoty (např. elektrony), tak záření (např. fotony). Daný prostor tedy neobsahuje hmotu, může do něj však zasahovat fyzikální pole (např. gravitační či magnetické). Takové vakuum bývá označováno jako dokonalé. Tento pojem využívá teoretická fyzika. O vakuu neobsahujícím pole se poté hovoří jako o prázdném prostoru. V klasické fyzice lze pojem vakuum zavést alespoň teoreticky. Podle kvantové teorie není totiž ani prostor bez jakékoliv hmoty úplně prázdný, ale probíhají v něm různé procesy (např. tvorba párů částic a antičástic a jejich opětovný zánik, kvantově-mechanické fluktuace apod.). Je tedy otázka, co lze pod pojmem vakuum rozumět. Americká vakuová společnost (American Vacuum Society) zavedla v roce 1958 definici, podle níž pojem vakuum označuje prostor naplněný plynem za tlaku nižšího, než je atmosférický tlak, tedy s hustotou molekul nižší než $2,5 \cdot 10^{19}$ molekul/cm³ [13]. Vakuum se v běžně odborné literatuře dělí podle tlaku na různé stupně, které poté nacházejí velmi rozmanitá uplatnění v akademickém výzkumu a v technické praxi. Hranice těchto stupňů však kolísají, a to zejména podle zemí, autorů a stáří definice. V dalším textu budu uvažovat výhradně pozitivní konvenci, což znamená, že nejnižší dosažitelný tlak má hodnotu nula. Vakuum se měří obvyklými jednotkami tlaku popsány v kapitole (2.3). Uvedené rozsahy mají pouze informační charakter. Převzato z [2, 21].

- atmosférický tlak (pouze pro tlak okolního vzduchu) $101,325 \cdot 10^3 \text{ Pa}$
- nízké vakuum $10^2 - 10^{-1} \text{ Pa}$
- vysoké vakuum (HV) $10^{-2} - 10^{-7} \text{ Pa}$
- ultravysoké vakuum (UHV) $10^{-7} - 10^{-10} \text{ Pa}$
- extrémně vysoké vakuum (XHV) $< 10^{-10} \text{ Pa}$
- dokonalé vakuum 0 Pa (absolutně prázdný prostor, hypotetická situace)

2.5 Střední volná dráha molekul

S pojmem vakuum souvisí pojem střední volná dráha molekul, což je průměrná vzdálenost, kterou molekula (částice) v prostoru urazí, aniž se srazí s jinou molekulou. Čím větší tedy bude v daném prostoru vakuum, tím větší bude i střední volná dráha molekul. Např. volný elektron za normálních podmínek v atmosféře nemůže urazit větší vzdálenost, než je jeho střední volná dráha tj. přibližně jedna desetitisícina milimetru. Ve vakuu o tlaku 10^{-4} Pa, kde je koncentrace molekul velice nízká, však dosahuje jeho střední volná dráha hodnoty 50 m. Střední volná dráha se spočítá jako [2]:

$$\lambda = \frac{RT}{p\sqrt{2}\pi\sigma^2 N_A}, \quad (2.3)$$

kde R je univerzální plynová konstanta, T je teplota, p je tlak, N_A je Avogadrova konstanta a σ je tzv. kolizní průměr molekuly.

plyn	σ [nm]
H ₂	0,275
He	0,225
N ₂	0,38
O ₂	0,365
H ₂ O	0,47
vzduch	0,375
CO ₂	0,465
Ar	0,36

Tab. 2.2: Kolizní průměr σ pro některé plyny | Převzato s úpravami z [2].

2.6 Získávání vakua

K vytvoření vakua se používá vakuových čerpadel, často nazývaných vývěvami, různých druhů a konstrukčních řešení. Jedná se o zařízení, jež odčerpává molekuly vzduchu či jiných plynů z uzavřeného prostoru. Lze je dělit podle fyzikálního principu činnosti či dle velikosti vakua, jež lze s danou vývěvou dosáhnout.

První takovéto zařízení v historii sestrojil v roce 1654 německý vědec, politik, fyzik a vynálezce Otto von Guericke (1602 – 1686). Objevil a zkonstruoval zařízení (vývěvu) na odčerpávání vzduchu z uzavřených nádob. Pozoroval, že vzduch je potřebný k hoření i pro šíření zvuku. V té době vzbudily největší ohlas jeho tzv. magdeburské pokusy. Spojil dvě kovové polokoule a pomocí vývěvy z nich odčerpával vzduch. Tyto polokoule poté nedokázalo od sebe odtrhnout ani osm párů koní. Když však vpustil dovnitř kohoutem vzduch, polokoule se oddělily bez použití síly. Tyto pokusy vyvrátily Aristotelovo tvrzení,

že příroda nesnáší prázdnotu, které bylo tehdy dogmatem. Ačkoliv možnost existence vakua byla zdánlivě mnohokrát vyvrácena v různých filosofických traktátech a scholastických disputacích, Guerickovy pokusy otevřely vědcům oči a umožnily zavrhnout Aristotelovy představy o prostoru a povšimnout si antické atomistické koncepce, ve které byla prázdnota přímo vyžadována pro pohyb hmotných atomů. Jednalo se o první veřejnou prezentaci využití vakua.

Vývěvy lze rozlišit podle způsobu, jakým dosahují snížení tlaku, na transportní a adsorpční. Transportní vývěvy odčerpávají z evakuovaného prostoru molekuly plynu procházející vývěvou, kdežto adsorpční vývěvy tyto molekuly zachycují uvnitř vývěvy. Již z tohoto je patrné, že vývěvy transportní mohou pracovat kontinuálně, zatímco vývěvy adsorpční obvykle pracují v cyklech. Transportní vývěvy se dále dělí na mechanické a hybnostní. Mechanické vývěvy dosahují snížení tlaku plynu cyklickou změnou objemu ve vývěvě. Hybnostní vývěvy pracují na principu přenosu impulzu, momentu hybnosti. V nich se molekule udílí rychlost (impulz) ve směru čerpání. Zjednodušeně lze říci, že čím nižšího tlaku (vyššího vakua) chceme dosáhnout, tím sofistikovanější zařízení musíme pro jeho vytvoření použít.

2.7 Využití vakua

Vakuum nalézá uplatnění ve vědě i v mnoha průmyslových odvětvích. Často jako součást výrobní technologie, například pro snížení teploty varu nebo teploty tání při úpravě látek.

V běžném životě se s ním lze setkat například ve vysavači, CRT (Cathode Ray Tube) obrazovkách, žárovkách či v magnetronu mikrovlnné trouby.

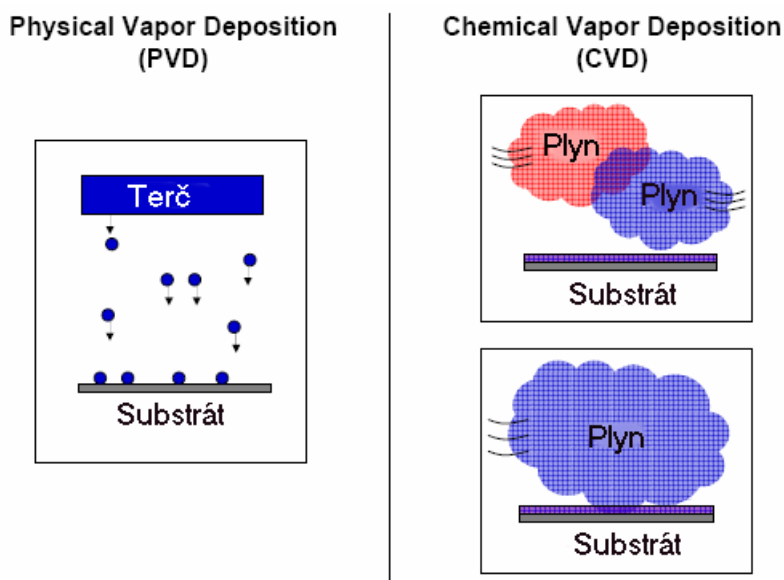
V průmyslu se používají vakuové přísavky a vakuové manipulatory pro uchopování předmětů. Využívá se také při výrobě a balení potravin, nebo jako dokonalá tepelná izolace nejen v termoskách, ale také ve zkapalňovačích a nejrůznějších kryotechnických zařízeních a přístrojích. Ve strojírenském průmyslu se uplatňuje např. při výrobě nejčistších materiálů ve vakuových pecích s elektrickým ohřevem a v elektronových svářečkách. Dále se používá pro homogenizaci materiálů při jejich výrobě, pro odstranění bublinek a zhutňování. Vakuové lití zajišťuje dokonalé vyplnění formy a brání vzniku bublin v odlitku. V chemickém průmyslu se vakuum využívá například při procesu destilace či rafinace. V dřevařském průmyslu se používají vakuové vysoušeče dřeva. V elektrotechnice se při výrobě polovodičů využívá prostředí vakua při depozici tenkých vrstev například metodou vakuového napařování, magnetronového napařování nebo iontového plátování.

Vakuum se dále uplatňuje v experimentální praxi při přípravě nanostruktur a tenkých vrstev, studiu základních částic, srážek a reakcí, při studiu chemických prvků, sloučenin a substancí, při měření metodami založenými na analýze elektronů, iontů a atomů a v urychlovačích částic.

3

Tenké vrstvy a jejich nanášení

Tenké vrstvy se používají pro úpravu povrchu nejrůznějších substrátů. Jejich tloušťka se pohybuje v rozmezí desítek nm až po jednotky μm . Do dnešního dne byla vyvinuta celá řada metod pro jejich nanášení (depozici). Metody depozice tenkých vrstev lze rozdělit do dvou skupin a to na metodu fyzikální (PVD - Physical Vapor Deposition) a chemickou (CVD - Chemical Vapor Deposition). Hlavní rozdíl mezi oběma metodami je způsob přípravy substrátu. Při fyzikální metodě se připravuje z pevného terče, při metodě chemické z plynu (viz obr. 3.1). Velmi důležitá je čistota substrátu. Proto se povrch před samotným procesem různými způsoby čistí. Musí být dobře odmaštěn, zbaven případných zbytků použitých činidel, po vložení do vakua je vhodné substrát zbavit adsorbované vrstvy plynů a par. [14, 15]



Obr. 3.1: Znázornění průběhů procesů PVD a CVD [Převzato z [14]]

3.1 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)

Při nanášení tenkých vrstev chemickou metodou se do systému přivádí směs chemicky reaktivních plynů (např. CH_4 , C_2H_2) zahřátá na teplotu 900 - 1100 °C. Reakční složky jsou přiváděny v plynné fázi a tenká vrstva na substrátu poté vzniká heterogenní reakcí.

Mezi výhody tohoto způsobu depozice patří vysoká odolnost proti opotřebení, ekonomicky nejvýhodnější možnost vytváření poměrně tlustých vrstev a schopnost povlakovat i nepřístupné dutiny a drážky. Vrstvy nanesené touto metodou se vyznačují větší adhezí vrstev k substrátu než v případě metody PVD. Uplatňuje se především při vytváření vrstev křemíku, oxidu křemičitého, vrstev na bázi uhlíku či vysoce čistých kovů (wolfram, molybden, tantal, titan, nikl). Jelikož depoziční proces probíhá za relativně vysokých teplot, v řadě případů nelze tento technologický postup použít, kvůli hrozící tepelné degradaci základního materiálu. Další nevýhodou je energetická a časová náročnost celého procesu a fakt, že prekuzory jsou často jedy nebo ekologicky závadné plyny [5, 14, 15, 18].

3.1.1 CVD iniciované plazmou

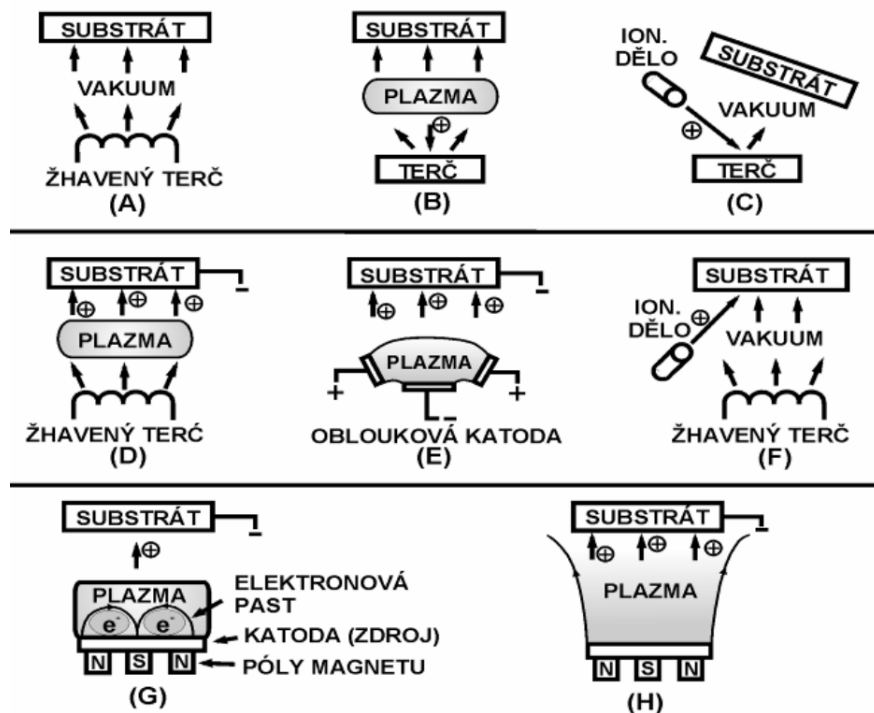
CVD iniciované plazmou (PECVD – Plasme Enhanced CVD) je metoda, jež využívá plazmatu pro iniciaci chemických reakcí (vytvoření výboje v plynu). Dochází ke srážkám elektronů s vysokou energií s těžkými molekulami plynu a následné produkci vysoce reaktivních částic.

Tuto metodu je výhodné používat zejména tam, kde by vlivem vysoké teploty používané při chemické depozici z plynné fáze mohlo dojít k teplotní degradaci substrátu. Například depozici nitridu křemíku, jež se u metody CVD provádí při teplotě okolo 800 °C, lze touto metodou provést při teplotě 250 °C. Tato metoda rovněž umožňuje depozici nových materiálů díky složitějším průběhům chemických reakcí v přítomnosti plazmatu.

Nevýhodou této metody je zejména obtížnější řízení reakce, horší selektivita produktů či možnost poškození substrátu energetickými ionty a UV zářením [5, 14, 15, 18].

3.2 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)

Touto metodou se nanáší tenké vrstvy na substrát kondenzací par pevného materiálu. Na rozdíl od CVD, není celý proces doprovázen žádnou chemickou reakcí a je prováděn za velmi nízkých tlaků. Tento technologický postup depozice tenkých vrstev je ekologicky nejšetrnější, neboť se nepoužívá žádný nebezpečný materiál a při procesu se neuvolňují žádné toxické látky. Další výhodou této metody je depozice probíhající při nižších teplotách a menší vnitřní pnutí vytvořených vrstev. Nevýhodou je horší adheze a teplotní stabilita vrstev. PVD proces umožňuje nanášet celou řadu materiálů – kovy, slitiny, směsi, polovodiče, supravodiče, polymery, k dispozici je i širší výběr substrátů. V dnešní době se používá spousta rozličných metod k vytváření tenkých vrstev fyzikální metodou [5, 14, 15, 18]. V této práci je použito dělení podle [5].



Obr. 3.2: Schématické znázornění různých PVD procesů [Převzato z [17]]

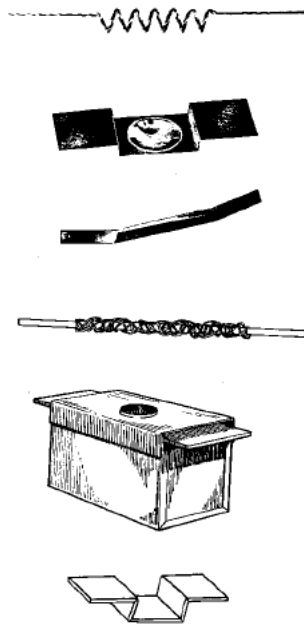
(A) vakuové napařování, (B) plazmové napařování, (C) vakuové napařování, (D) iontové plátování s termálním zdrojem, (E) iontové plátování s obloukovým zdrojem, (F) depozice za asistence iontového paprsku, (G) napařování s rovnovážným magnetronem, (H) napařování s nerovnovážným magnetronem

3.2.1 Vakuové napařování

Při tomto PVD procesu se materiál vypařuje ze zdroje, který je zahřátý na teplotu, při níž je tlak jeho nasycených par větší než Pa. Vakuum umožňuje molekulám napařovaného materiálu dosáhnout povrchu substrátu jen s minimem srážek. Díky mnohem nižší teplotě substrátu, než je teplota vypařovacího zdroje, kondenzují molekuly napařovaného materiálu zpět do pevné fáze. V oblasti velmi nízkých tlaků není přítomno mnoho molekul vzduchu, které by mohly přenos materiálu ovlivňovat. Tlak zbytkové atmosféry musí být velmi nízký, aby střední volná dráha molekul napařovaného materiálu byla větší než vzdálenost zdroje od substrátu, hustota toku molekul napařovaného materiálu na substrát výrazně převyšovala hustotu toku molekul atmosféry a aby docházelo k minimu srážek během transportu materiálu ze zdroje na substrát (chemické reakce atmosféry s napařovaným materiálem a zdrojem musí být zanedbatelné). Prostředí vakua rovněž poskytuje možnost snížit úroveň plynného znečištění v depozičním systému. Typicky je proces uskutečňován v prostředí o tlaku 10^{-3} až 10^{-7} Pa podle úrovně přípustného plynného znečištění. Rychlost tepelného odpařování může být velmi vysoká v porovnání s jinými odpařovacími metodami [5, 6, 14, 18].

Vypařovací zdroj se v tomto případě zahřeje na požadovanou teplotu pomocí odporo-

vého ohřevu průchodem elektrického proudu. Zdroje bývají buď různě tvarované wolframové dráty (silamenty), nebo tenké pásky z wolframu, tantalu či molybdenu ve tvaru „lodiček“. Nanášený materiál je buď vložen přímo na tyto topné elementy, nebo se vkládá do nádoby ze žáruvzdorné keramiky (např. Al_2O_3). V případě přímého vložení je nutno dávat pozor na možné vzájemné reakce. Ohřevu a odpaření lze také docílit bombardováním povrchu materiálu vysokoenergetickým elektronovým svazkem (EBPVD - Electron Beam Physical Vapor Deposition) či pomocí laserového svazku [5, 6, 18].



Obr. 3.3: Příklady vypařovacích zdrojů používaných při vakuovém napařování [Převzato z [18]]

Vakuové napařování se používá např. k tvorbě optických interferenčních vrstev, zrcadlových vrstev, dekorativních vrstev, elektricky vodivých vrstev, vrstev odolných proti opotřebení a antikoročních vrstev [5].

3.2.2 Naprašování

Naprašování je odpařovací proces, ve kterém je zdroj zapojen jako katoda a jeho povrch je bombardován ionty pracovního plynu (často se k těmto účelům používá Ar). Atomy deponované látky jsou takto odprašovány z povrchu zdroje a vytvářejí povlak na substrátu. Obvykle je vzdálenost zdroje a substrátu menší v porovnání s jejich vzdáleností při vakuovém napařování. Naprašování může být provedeno bombardováním pevného povrchu energetickými ionty ve vakuu s použitím iontového děla nebo nízkotlaké plazmy ($<0,7$ Pa), kde naprašované částice čelí málo nebo žádným srážkám během přesunu ze zdroje na substrát. Naprašování může být rovněž prováděno v plazmě o vyšší tlaku

(0,7 - 4 Pa), kde jsou energetické částice odprášené ze zdroje otepleny kolizemi v plynné fázi před dosažením povrchu substrátu. Plazma použitá při naprašování může být soustředěna blízko bombardovaného povrchu nebo může vyplňovat prostor mezi zdrojem a substrátem. Zdroj může být prvek, slitina, směs nebo sloučenina. Sloučeniny jako nitrid titanu (TiN) či nitrid zirkonia (ZrN) jsou běžně naprašovány použitím reaktivního plynu v plazmě. Přítomnost plazmy aktivuje tento plyn a učiní ho tak více chemicky reaktivním [5, 16].

V případě magnetronového naprašování je plazma lokalizováno pomocí magnetického pole v těsné blízkosti katody. Siločáry magnetického pole prodlužují dráhu elektronů v plazmatu a zvyšují tak počet ionizujících kolizí s neutrálními částicemi pracovního plynu. Vzniká tak velmi husté plazma, které je zdrojem většího množství bombardujících iontů [15].

Naprašování se často používá k nanášení tenkých kovových vrstev na polovodičový materiál, k nanášení povlaků na stavební skla, reflektivních vrstev na kompaktní disky, magnetických vrstev, dekorativních vrstev a spousty dalších [5].

3.2.3 Obloukové vypařování

Obloukové vypařování (Arc Vapor Deposition) používá nízkonapěťový oblouk o vysokém proudu k odpařování katody (katodový oblouk) či anody (anodový oblouk) a depozici odpařeného materiálu na substrát. Vytvořený výboj se soustředí do malého bodu, do vysoce energeticky vybuzené oblasti známého jako katodová skvrna. Teplota přivedená na katodovou skvrnu je extrémně vysoká (okolo 15 000 °C). To má za následek vysokou rychlost paprsku vypařeného materiálu (10 km/s), který za sebou na povrchu katody zanechá kráter. Katodová skvrna je aktivní jen po krátký čas, poté sama zhasne a znovu se zapálí blízko původního oblouku. Odpařený materiál je vysoce ionizován. Pokud se během vypařování přivede reaktivní plyn, na povrchu substrátu se vytvoří tenká vrstva. K urychlení vzniklých iontů se obvykle používá předpětí substrátu [17].

3.2.4 Iontové plátování

Iontové plátování, často nazývané Ion Assisted Deposition (IAD) nebo Ion Vapor Deposition (IVD), využívá nepřetržité nebo periodické bombardování povrchu substrátu a utvářející se vrstvy energetickými částicemi o velikosti atomů, k úpravě a kontrole vlastností nanášených vrstev. Při iontovém plátování jsou energie, proudění a hmotnost bombardujících částic spolu s poměrem bombardujících částic k nanášeným částicím důležité proměnné. Depoziční materiál se do plynného skupenství převádí fyzikálním procesem. Může být odpařen napařováním, naprašováním, obloukovým vypařováním nebo rozkladem chemického prekursoru. Energetické částice použité k bombardování jsou obvykle ionty inertního či reaktivního plynu, nebo v některých případech ionty kondenzujícího materiálu vrstvy. Jejich energie je určena elektrickým napětím přivedeným na deponovaný

materiál. Iontové plátování může být prováděno v prostředí s plazmou, kde je plazma zdrojem iontů pro bombardování, nebo ve vakuu, kde jsou ionty pro bombardování tvořeny v odděleném iontovém děle (IBAD - Ion Beam Assisted Deposition) [5, 6, 14, 15, 18].

Dopad iontů během nanášení výrazně ovlivňuje vlastnosti výsledné vrstvy (například tvrdost, vnitřní pnutí, adhezi k substrátu) a rovněž dovoluje vznik sloučenin při teplotě podstatně nižší, než odpovídá rovnovážné chemické reakci. Při použití reaktivního plynu v plazmě lze nanášet vrstvy kompozitních materiálů [24].

Iontové plátování dovoluje efektivně nanášet povlaky rozmanitého složení, vynikajících mechanickým vlastností a atraktivního vzhledu i na tepelně zušlechtěné materiály, nebo dokonce na plasty. Používá se např. k nanášení těžkých povlaků z kompozitních materiálů, přilnavých kovových povlaků nebo optických povlaků s vysokými hustotami [5].

4

Možnosti měření tlaku pro potřeby vakuových depozičních procesů v elektrotechnice

Pro potřeby vakuových depozičních procesů, jakými jsou např. vakuové napařování či napařování, je nutno zajistit v celém systému velice nízký tlak, tak aby celý proces vytváření tenké vrstvy na povrchu substrátu proběhl optimálně. K měření tlaku ve vakuovém systému byla vyvinuta celá řada metod. Většina principů využívá k určení tlaku prostředky založené na změně vlastností plynu v závislosti na tlaku. Jedná se například o změnu viskozity, tepelné vodivosti či elektrické vlastnosti ionizovaného plynu. Tato měřidla jsou citlivá na druh použitého plynu a vyžadují provedení korekce k dosažení správných výsledků. Nevezme-li se v potaz tento fakt, může dojít ke značným chybám. Například přítomnost argonu ve vakuovém systému může mít za následek, že hodnota tlaku změřená na vakuometru pracujícím na principu tepelné vodivosti plynu (například Piraniho vakuometr), bude mnohem nižší, než skutečný tlak v tomto systému [1, 2, 4, 5].

Vakuometry, jejichž údaj nezávisí na použitém plynu (měří tlak absolutně), jsou ty, u nichž tlak způsobuje deformaci měřícího prvku (membránové vakuometry, Bourdonova trubice, kapacitní snímač tlaku) [4, 5].

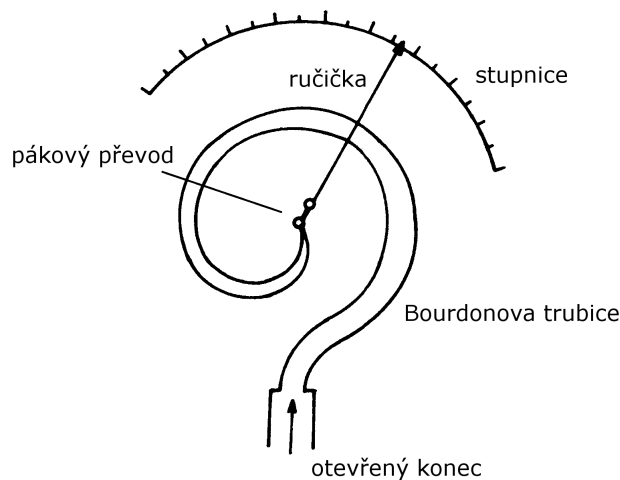
Pro měření vakua při vakuových depozičních procesech se jistě musí použít vhodná metoda, jejíž měřící rozsah pokryje i oblast takto nízkých tlaků. Často se používají tepelné vakuometry (odporový, termočlánekový), kapacitní snímač tlaku, Langmuirův - Dushmanův vakuometr, ionizační vakuometr se žhavenou katodou, ionizační vakuometr se studenou katodou. Pro přehled jsou však uvedeny i některé další metody. Velmi často se v praxi setkáváme s vakuovými měřkami, jež kombinují více metod, díky čemuž dosahují širokého měřícího rozsahu [1, 2, 4].

4.1 Mechanické (deformační) tlakoměry

Vakuometry využívající pružný element patří mezi silové mechanické vakuometry. Využívají pro měření tlaku měřící prvek (nejčastěji membránu), který se působením tlaku deformuje. Vždy jde o působení na element ze dvou stran. Membrána se prohne v závislosti na rozdílu tlaku vně a uvnitř prostoru, který rozděljuje. Může mít i tvar trubice s vlnitým povrchem, tzv. vlnovec, jejíž délka se mění v závislosti na rozdílu tlaků uvnitř a vně trubice. Dolní hranice jejich měřícího rozsahu je určena velikostí tlaku, při níž se vliv síly působící na membránu stane zanedbatelným [2, 4].

4.1.1 Bourdonova trubice

Bourdonova trubice využívá jako pružný element spirálovitě zatočenou kuželovitou trubičku, jejíž vnitřní konec je uzavřen a vnější zakončen závitem pro připojení k prostoru, v němž je měřen tlak. Spirálovité zakřivení trubičky (Bourdonovy trubice) se mění v závislosti na hodnotě tlaku. Pomocí mechanického převodu se tento pohyb zvětší a je přenášen na ručičku. Princip těchto vakuometrů je velice jednoduchý, jsou nenáročné a lze je použít pro měření v oblastech hrubého vakua 10^5 Pa až do tlaků okolo 10^2 Pa, přičemž odčítání hodnoty tlaku u dolní hranice měřícího rozsahu je ve většině případů nepřesné [2, 4].

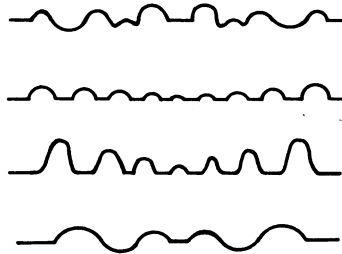


Obr. 4.1: Schématické znázornění vakuometru s Bourdonovou trubicí |Převzato s úpravami z [4]

4.1.2 Membránové vakuometry

Přesnější, ale náročnější jsou vakuometry, v nichž je jako pružný element použita membrána. Membrána má kruhovitý tvar a zvlněný profil, díky čemuž je dosaženo lineárnějšího průhybu v závislosti na tlaku. Různé profily kruhových membrán jsou na obr. (4.2). Údaj membránového vakuometru závisí na velikosti membrány a na její tloušťce. Často se pro výrobu membrán používají materiály jako mosaz, fosforový bronz, antikorozi ocel,

křemen a slída. Plastové membrány se používají pro měření v oblasti hrubého vakua. Pro stanovení výchylky membrány z rovnovážné polohy se používají nejrůznější způsoby. Používají se např. mechanické převody, kapalinové, optické, kombinované mechanicko-elektrické a elektrické převody. Výhodou elektrických a mechanicko-elektrických převodů je především fakt, že údaj vakuometru lze sledovat dálkově [2, 4].



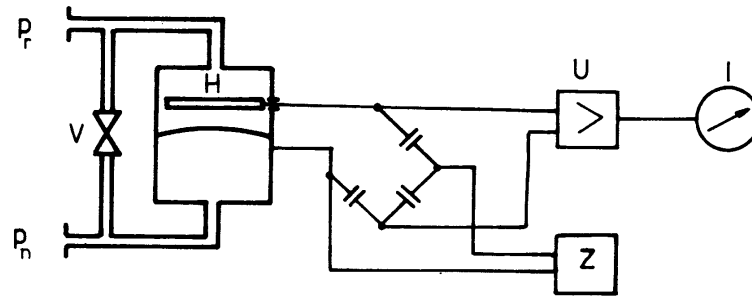
Obr. 4.2: Různé profily kruhových membrán |Převzato z [4]|

Měřicí rozsah těchto vakuometrů je různý. Závisí především na konstrukci membrány způsobu stanovení její výchylky. Obecně však lze říct, že při použití mechanických převodů lze měřit tlak v rozsahu $10^5 - 10^2$ Pa. V oblasti nižších tlaků jsou výchylky membrány velmi malé a je nutné použít elektrické metody [4].

4.1.3 Kapacitní membránový vakuoměr

Nabízí se použití kapacitního membránového vakuoměru, jež je tvořen elektrodovým systémem, ve kterém je jedna z elektrod pevná a druhou elektrodu tvoří pohyblivá membrána, která vlivem změny tlaku změní svou polohu. Tím se změní i kapacita mezi oběma elektrodami. Ta je dále elektronicky vyhodnocena a převedena na hodnotu tlaku. Sledováním změny kapacity mezi membránou a referenční elektrodou lze měřit tlaky v rozmezí $10^6 - 10^{-1}$ Pa. Dnes však existují i snímače schopné měřit tlak až do 10^{-3} Pa. Schéma funkčního principu kapacitního vakuometru je na obr. (4.3). Ve středu měřící hlavičky je umístěna membrána oddělující prostor s měřeným tlakem a prostor s tlakem referenčním. Společně s pevnou elektrodou tvoří měřící kondenzátor. Při rozdílném tlaku v obou prostorech je membrána deformována. Tím dojde ke změně kapacity tohoto kondenzátoru, který je zapojený tak, že tvoří jednu větev střídavého můstku. Se změnou kapacity měřícího kondenzátoru se změní i výstupní napětí střídavého můstku. Tato změna je následně zesílena, usměrněna a indikována. Kapacitní membránový vakuoměr je nepostradatelný pro měření pracovního tlaku u plazmových depozičních aparatur, zejména pro nezávislost jeho údajů na druhu plynu [1, 2, 4].

Velkou výhodou tohoto druhu vakuometrů je zejména fakt, že se u nich neuplatňuje čerpací efekt a neuvolňují žádné plyny, jež by mohly narušit proces měření. Jejich údaj nezávisí na druhu plynu a tlak měří absolutně [2, 4].



Obr. 4.3: Funkční schéma kapacitního membránového vakuometru [Převzato z [4]]

H - hlavice, V - ventil, p_r - referenční tlak, p_n - měřený tlak, I - indikační přístroj, Z - zdroj



Obr. 4.4: Příklad skutečného provedení kapacitního membránového vakuoměru [Převzato z [20]]

4.1.4 Snímače s odporovými tenzometry

Tenzometrické snímače (někdy též nazývané snímače s proměnlivým odporem) jsou velmi často používanými elektrickými tlakovými převodníky. Odporový tenzometr je senzor, u něhož se využívá tzv. piezorezistivního jevu. Při mechanickém namáhání v oblasti pružných deformací dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám v krystalové mřížce, které vedou ke změně elektrického odporu. Tato zařízení se při měření zapojují do měřících můstků, čímž se velice malé hůře měřitelné změny elektrického odporu převedou na změny napětí. Snímače s odporovými tenzometry jsou používány zejména pro měření rychle se měnících tlaků [2].

Kovové odporové tenzometry se vyrábějí z odporových drátků průměru 0,02 až 0,05 mm, které jsou nalepeny na tenký podklad z papíru nebo z plastické hmoty. Mají tvar mnohonásobné vlásenky. Konce drátku jsou připájeny na tlustší vývody. Celý tenzometrický snímač se na měřenou součást přilepí speciálním lepidlem. Jelikož se měří deformace tenzometru a ne deformace membrány, je nutno tento krok provést velice pečlivě. Tenzometrické snímače složitých tvarů (radiální, spirálové aj.) se dnes vyrábějí odleptáváním tenké odporové fólie [2].

Polovodičové tenzometry se vyrábějí se z křemíku, a to buď řezáním, broušením či leptáním monokrystalu nebo planární technologií na křemíkovém nebo jiném substrátu. Působením mechanického namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo v difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Změna elektrického odporu závisí na typu polovodiče i na koncentraci příměsí. Aktivní část, proužek z polovodiče, se lepí vhodným lepidlem na plochu podléhající deformaci [2].

Problémem těchto zařízení je velká citlivost na změnu teploty. Elektrický odpor tenzometru je závislý na teplotě stejně jako žhavené vlákno v případě Piraného vakuometru (vztah 4.2). Změna teploty rovněž způsobí dilataci deformovaného materiálu, na němž je snímač přilepen. Tyto změny je nutno kompenzovat buď volbou vhodného materiálu s takovým teplotním koeficientem elektrického odporu α , aby kompenzoval nárůst odporu vlivem dilatace, nebo způsobem zapojení do měřícího můstku [2].

4.2 Vakuometry založené na přenosu impulsu

Tyto vakuometry se rovněž řadí mezi vakuometry mechanické. Jejich princip spočívá v nuceném pohybu hmotného elementu v prostoru měřky. Přítomný plyn v závislosti na koncentraci (tlaku) tento pohyb více či méně brzdí. Viskózní vakuometry využívají pro svoji funkci zákonitosti tření (přenosu impulsu). Jelikož přenos impulsu za vysokého vakua lineárně závisí na tlaku, lze tuto závislost použít pro měření tlaku [4].

4.2.1 Langmuirův-Dushmanův vakuometr

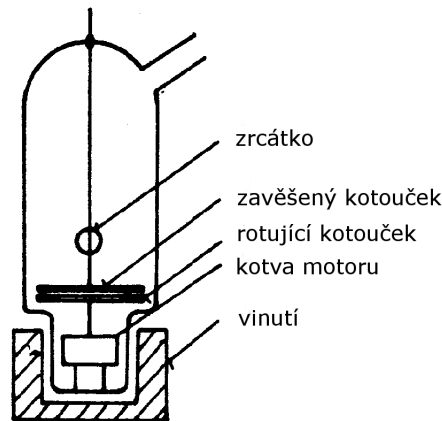
Tento vakuometr, jinak také nazývaný rotačně viskózní vakuometr, sestává z jednoho rotujícího kotoučku poháněného elektromotorem a jednoho pevného kotoučku zavěšeného na jemném vlákně. Rotující kotouček uvádí molekuly plynu do pohybu a ty takto získaný impuls přenášejí na pevný kotouček. Výsledkem je jeho pootočení. Úhel natočení zrcátka je zde funkcí viskozity plynu v evakuovaném prostoru: impuls se snadněji přenáší, má-li plyn vyšší viskozitu a tedy i vyšší tlak. Tento úhel lze sledovat pomocí světelného paprsku dopadajícího na zrcátko, jenž se odrazí na stupnici [2, 4, 5]. Schématické znázornění Langmuirova-Dushmanova vakuometru je na obr. (4.5).

V [4] je odvozen vztah pro hodnotu tlaku:

$$p = \frac{\omega' 2J\bar{v}}{\omega R^4} \cdot \frac{d}{D_z} \quad (4.1)$$

kde R - poloměr zavěšeného kotoučku, J - moment setrvačnosti zavěšeného kotoučku, ω' - kruhová frekvence volných kmitů zavěšeného kotoučku, ω - kruhová frekvence rotujícího kotoučku, d - výchylka stopy světelného paprsku na stupnici, D_z - vzdálenost zrcátka od stupnice.

Ze vztahu (4.1) je zřejmé, že údaj tlaku závisí na druhu plynu a navíc je zatížený chybou neurčitosti koeficientů skluzu, která není v úvaze zahrnuta. Proto musí být druh



Obr. 4.5: Schématické znázornění Langmuirova-Dushmanova vakuometru [Převzato s úpravami z [4]]

měřeného plynu znám. Kalibrace tohoto vakuometru probíhá pomocí absolutních vakuometrů. Poté se tlak plynu určuje z kalibrační křivky, jenž je v tomto případě funkcí výchylky d na tlaku p . Tento vakuometr je vhodný pro měření tlaků v rozsahu $1 - 10^{-6}$ Pa. Dolní hranice je dána nestabilitou při nízkých tlacích. Dojde-li k rozkmitání kotoučku například vlivem mechanických otřesů či rotujícího elektromagnetického pole, tlumí se tyto kmity při nízkých hodnotách tlaku jen velmi málo [4].

4.3 Tepelné vakuometry

4.3.1 Odporový (Piraniho) vakuometr

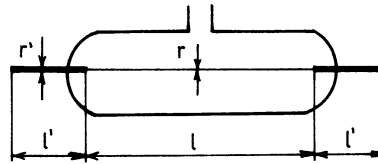
Piraniho měřka je zařízení, jež vynalezl německý fyzik Marcello Pirani v roce 1906, které pracuje na principu změny tepelné vodivosti plynu v závislosti na jeho absolutním tlaku. Tlak se měří pomocí vlákna žhaveného průchodem elektrického proudu na konstantní teplotu mezi 110°C a 130°C , které je z materiálu s vysokým teplotním koeficientem elektrického odporu. Žhavené vlákno je zavěšeno uprostřed baňky. Vzniklé teplo je odváděno přítomnými molekulami plynu do stěn této baňky. Množství přeneseného tepla závisí na koncentraci plynu a tudíž i na jeho tlaku. Čím nižší je tlak, tím méně molekul plynu se vyskytuje v evakuovaném prostoru a tím méně tepla je tímto prostorem přenášeno, díky tomu se zvýší teplota vlákna a tedy i velikost jeho elektrického odporu R_T . Je-li teplota vlákna udržována konstantní, je tepelná ztráta funkcí tlaku. Ze závislosti odporu kovového vlákna na teplotě vyplývá, že nejvhodnější je použít kovy, které mají teplotní koeficient elektrického odporu co nejvyšší. Proto se používají zejména vodiče z platiny, wolframu, niklu či molybdenu. Aby byl čas odezvy krátký, volí se průměr vlákna cca $10 \mu\text{m}$ [2, 5, 4]. Elektrický odpor se s teplotou mění dle vztahu [4]:

$$R_T = R_0(1 + \alpha_0(T - T_0)) \quad (4.2)$$

Odkud je teplota vlákna:

$$T = \frac{R_T - R_0}{\alpha_0} + T_0, \quad (4.3)$$

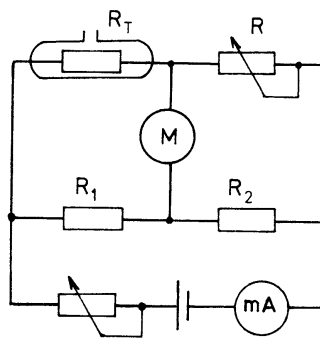
kde R_T je el. odpor vlákna při teplotě T , R_0 je el. odpor vlákna při teplotě T_0 , α_0 je teplotní koeficient el. odporu materiálu vlákna.



Obr. 4.6: Schématické znázornění Piraniho vakuometru [Převzato z [4]]

r' - poloměr přívodů, l' - délka přívodů, r - poloměr odporového vlákna, l - délka odporového vlákna

Změnu odporu R_T lze velmi dobře zaznamenat při použití Wheatstonova můstku (obr. 4.7), jehož ramena tvoří dva stejné rezistory R_1 a R_2 , Piraniho měřka R_T a regulační rezistor R . Můstek se vyváží nejčastěji při atmosférickém tlaku nebo při vysokém vakuu. Klesne-li tlak a sníží-li se tedy počet molekul, zmenší se i množství odváděného tepla a vzroste teplota vlákna a tak i jeho el. odpor R_T , díky čemuž dojde k rozvážení Wheatstonova můstku a měřicím přístrojem M začne protékat el. proud úměrný velikosti tlaku ve vakuovém systému, k němuž je měřka připojena. Tento typ měřky je vhodný pro měření tlaků v rozsahu 10^{-1} až 10^5 Pa. Existují ještě další druhy tepelných vakuometrů, v nichž se jako měřicí element místo vlákna s vysokým teplotním koeficientem el. odporu používá např. termočlánek či bimetalový pásek [4].



Obr. 4.7: Schéma zapojení Piraniho vakuometru do Wheatstonova můstku [Převzato z [4]]

Jak již bylo zmíněno výše, žhavené vlákno se vyhřívá průchodem konstantního el. proudu. Takto přivedená energie se spočte jako:

$$W = RI^2, \quad (4.4)$$

kde R je odpor žhaveného vlákna, I je el. proud procházející měřicím elementem. Tato energie se udržuje konstantní a v rovnovážném stavu se rovná energii odvedené z vlákna za sekundu, tedy:

$$W = RI^2 = W_\lambda + W_z + W_n, \quad (4.5)$$

kde W_λ je energie odvedená molekulami plynu, W_z je energie odvedená vyzařováním, W_n je energie odvedená nosiči vlákna, jež do něj zároveň přivádí el. proud. Vlákno se průchodem el. proudu zahřeje na teplotu T_1 , stěny baňky, v níž je umístěno, mají teplotu T_2 . Označíme-li střední teplotu molekul plynu po srážce se žhaveným vláknem T_3 a po srážce se stěnou T_4 , potom je za podmínek vysokého vakua přenesená energie úměrná rozdílu teplot ($T_3 - T_4$). Platí vztah:

$$W_v = \lambda'_v p (T_3 - T_4) A, \quad (4.6)$$

kde A je plocha zahřátého elementu, λ_v je koeficient tepelné vodivosti ($\lambda_v = \lambda'_v \cdot p$).

Po další úpravě vztahu (4.7) dostaneme energii přenesenou molekulami plynu:

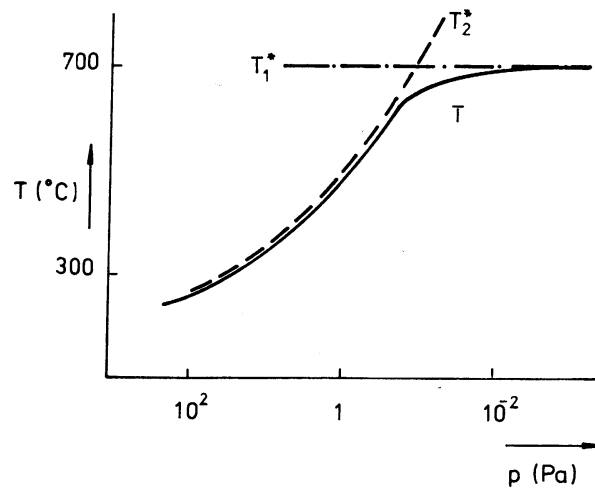
$$W_v = \lambda'_v p (T_1 - T_2) A \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2}, \quad (4.7)$$

kde T_1 je teplota žhaveného vlákna, T_2 je teplota stěn baňky, α_1 a α_2 jsou koeficienty akomodace.

Přenos energie molekulami plynu lze využít, dokud není množství energie odvedené parazitními jevy, tzn. vyzařená energie W_z a energie odvedená nosiči vlákna W_n , výraznější, než energie odvedená molekulami plynu. Vhodným návrhem přívodů, zejména konstrukcí přívodů s vhodným poloměrem a délkou a použitím materiálu s malým koeficientem tepelné vodivosti, lze dosáhnout toho, že v libovolné oblasti tlaků bude energie odvedená nosiči vlákna W_n v porovnání s energií odvedenou vyzařováním či molekulami plynu mnohem menší. Na obr. (4.8). je znázorněna závislost teploty vyhřívaného vlákna na tlaku. V oblasti velmi nízkých tlaků se projeví parazitní ztráty energie. V okamžiku, kdy množství energie odvedené vyzařováním bude výrazně vyšší, než množství energie odvedené molekulami plynu, pozvolna přestává teplota vlákna narůstat. Horní hranici měřicího rozsahu limitují především charakteristický rozměr vakuového systému a střední volná dráha molekul. Díky působení těchto faktorů má závislost typický tvar křivky S. Z tvaru tohoto průběhu vyplývá, že vakuometr má největší citlivost ve střední oblasti, kde dosahuje závislost nejvyšší strmosti [2, 4, 5].

4.3.2 Termočlánekový tepelný vakuometr

Další způsob, kterým lze určit teplotu vyhřívaného kovového vlákna, spočívá v použití termočlánu, který se měřícím koncem dotýká vlákna elektricky odizolovaného od termočlánu. Princip je v podstatě stejný jako v případě odporového vakuometru. V tomto případě se však pro určení hodnoty tlaku využívá termoelektrického jevu. Teplota vlákna se při daném tlaku ustálí na určité hodnotě dané množstvím odváděného tepla molekulami plynu. V tomto případě se však měří termoelektrické napětí vzniklé na konci termočlánu. To lze spočítat jako [4]:



Obr. 4.8: Závislost teploty vyhřívaného vlákna na tlaku [Převzato z [4]]

$$U_E = \alpha_E(T - T_0), \quad (4.8)$$

kde α_E je koeficient termoelektrického daný použitým dvojkovem, T_0 je teplota studeného konce termočlánku, T je teplota teplého (měřícího) konce termočlánku.

Závislost termoelektrického napětí na tlaku má stejný průběh jako závislost teploty na tlaku u odporového vakuometru. V praxi se termočlánekové vakuometry zapojují do měřících můstků, a to do jedné, dvou nebo čtyř větví můstku. Jako materiál pro výrobu termočláneků se používají železo, konstantan, platina či rhodium [4].

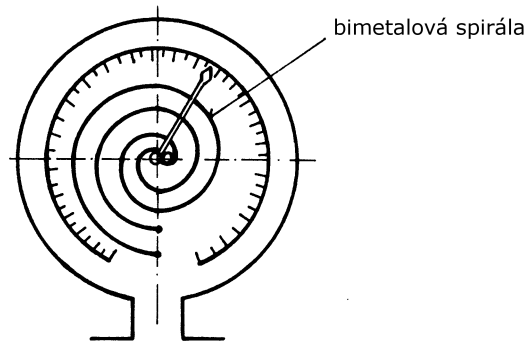
4.3.3 Další druhy tepelných vakuometrů

Dále může být u tepelných vakuometrů použit jako měřící prvek termistor, což je polovodičový element, jehož odpor výrazně klesá s narůstající teplotou. Má tedy záporný teplotní koeficient elektrického odporu, který je však v absolutní hodnotě vyšší, než je tomu u kovů používaných v odporových vakuometrech. Tepelný vakuometr s termistorem je tedy citlivější na změnu tlaku [2, 4].

Existují i tzv. dilatační vakuometry, jež pro měření využívají spirálu či bimetalový pásek, jímž prochází elektrický proud. Pásek se ohne v závislosti na jeho teplotě, jež závisí na tlaku. Rozsah měření těchto vakuometrů je srovnatelný s ostatními druhy. Jejich nevýhodou je však pomalá odezva na změnu tlaku [4].

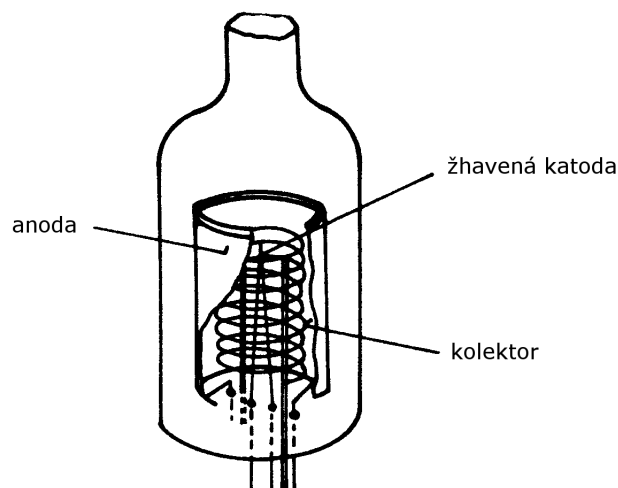
4.4 Ionizační vakuometr se žhavenou katodou

Ionizační vakuometr se žhavenou katodou sestává ze tří elektrod – anody, katody a kolektoru, jež funguje jako měřící elektroda. Jejich uspořádání je často souosé. Katoda ve formě žhaveného vlákna slouží jako zdroj emitující elektrony. Z hlediska konstrukce se jedná v podstatě o elektronku (triodu), hojně používanou v elektrotechnice v dřívějších



Obr. 4.9: Schématické znázornění dilatačního tepelného vakuometru s bimetalovou spirálou [Převzato s úpravami z [4]]

dobách před vynálezem tranzistoru. V ose měřky je žhavená katoda, okolo níž je v určité vzdálenosti navinutá řídká spirála (kolektor). Venkovní elektroda je anoda ve tvaru válce [2, 4, 5].



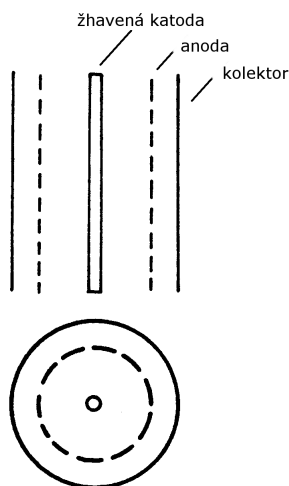
Obr. 4.10: Schématické znázornění ionizačního vakuometru se žhavenou katodou [Převzato s úpravami z [4]]

Elektrony emitované rozžhaveným katodovým vláknem z vhodného materiálu (např. wolframu) se urychlují směrem k anodě, přičemž anodový proud (proud elektronů) se žhavicím obvodem udržuje na konstantní hodnotě. Při srážkách s molekulami zbytkového plynu urychlené elektrony tyto molekuly ionizují. Jejich množství závisí na koncentraci plynu a tedy i na tlaku. Takto vzniklé kladné ionty jsou z ionizačního prostoru měřky odsávány kolektorem, který má vůči katodě záporné napětí. Tlak plynu se poté zpětně určuje z naměřeného proudu na kolektoru. Při kolektorovém napětí -20 až -50 V, anodovém napětí 100 až 300 V, emisním proudu 0,5 až 20 mA a při stálém tlaku je poměr kolektorového proudu I_k a anodového proudu I_a konstantní [4].

$$\frac{I_k}{I_a} = K_p \quad (4.9)$$

Citlivost K_p ze vztahu (4.9) je při jednotkovém tlaku ($p = 1$ Pa) dána poměrem proudu iontů I_k a proudu elektronů I_a . Určená je počtem kladných iontů N_i dopadajících na kolektor připadajících na jeden ionizující elektron. Počet iontů N_i tedy určuje, kolik srážek z' uskuteční jeden elektron po jeho dráze. Pokud elektron uskuteční na jednotkové dráze z srážek, potom na dráze x , na níž má větší energii než ionizační, uskuteční $z' = z \cdot x$ srážek. Zvětšením dráhy x , kterou elektron urazí, lze tedy zvýšit počet srážek a tím i citlivost celé měřky [4].

Prodloužení dráhy elektronů lze docílit změnou funkce elektrod (obr. 4.11). Řídká spirálovitá mřížka v tomto uspořádání zastává funkci anody a venkovní válcovitá elektroda je měřicí elektrodou (kolektorem). Spirálovitá anoda opět urychluje emitované elektrony. Ty skrz ni prolétají směrem ke kolektoru, který má vůči katodě záporný potenciál, a vrací tedy elektrony zpět k anodě. To vede k vykonávání složitých oscilačních pohybů okolo kladně nabitě anody, až na ní elektrony nakonec zůstávají [2, 4].



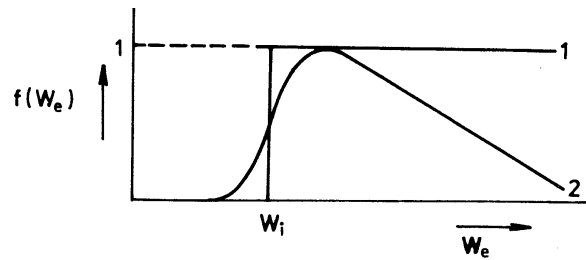
Obr. 4.11: Ionizační vakuometr se žhavenou katodou s vyměněnou funkcí elektrod [Převzato s úpravami z [4]]

K ionizaci atomů a molekul však nemusí dojít vždy. Tento děj vzniká jen při určitém počtu srážek molekul a elektronů s dostatečnou energií vyjádřenou pravděpodobností ionizace. Pravděpodobnost ionizace $f(W_e)$ závisí na energii elektronů a druhu plynu uvnitř prostoru. Zdálo by se, že jakmile se dosáhne vyšší energie elektronů, než je energie nutná pro odtržení jednoho elektronu z daného atomu či molekuly (ionizační energie), způsobí každá srážka ionizaci molekul tohoto plynu. Avšak ve skutečnosti má závislost pravděpodobnosti ionizace na energii elektronů své maximum, jiné pro každý druh plynu (obr. 4.12). Pohybuje se v rozpětí 100 až 200 eV. Jedná se o jeden z faktorů, podle něžž se volí anodové napětí [4].

Počet iontů dopadajících na kolektor lze určit jako:

$$N_i = z' \eta_k f(W_e) = \frac{I_k}{I_a} = K, \quad (4.10)$$

kde z' je počet srážek, jež elektron vykoná na dráze x , na níž má větší energii než je



Obr. 4.12: Pravděpodobnost ionizace [Převzato z [4]]

ionizační energie daného plynu, $f(W_e)$ je pravděpodobnost ionizace a η_k je odsávací účinnost kolektoru. Ta závisí na jeho tvaru a potenciálu. Při jednotkovém tlaku se počet iontů dopadajících na kolektor rovná citlivosti ionizačního vakuometru se žhavenou katodou [4].

Potenciál kolektoru se volí jen v určitém malém rozsahu hodnot. Dosahuje-li potenciál kolektoru vysokých záporných hodnot, snižuje se citlivost měřky, kvůli zkrácení účinné dráhy kolektoru x , v důsledku snížení jeho rychlosti a energie v kolektorové oblasti. Vysoký záporný potenciál kolektoru má rovněž vliv na sekundární emisi elektronů z kolektoru. Při hodnotách potenciálu blízkých nule zase pronikají některé elektrony na kolektor, čímž se snižuje citlivost a zkresluje měřený údaj .

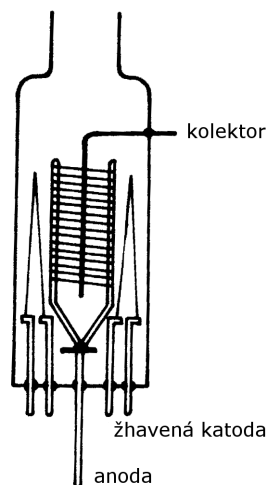
Citlivost této měřky je tedy komplikovanou funkcí anodového a kolektorového napětí, účinné dráhy elektronu, pravděpodobnosti ionizace, a tedy i druhu plynu. Určuje se tedy experimentálně při kalibraci vakuometru.

Horní hranici měřícího rozsahu tohoto vakuometru limituje odolnost žhavené katody. Běžně jí lze měřit do tlaků 10^{-2} Pa. V oblasti nízkých tlaků se závislost proudu kolektoru na tlaku odchyľuje od linearitu a proud kolektoru přestává být závislý na tlaku. Příčinou je Röntgenův jev. Elektrony emitované katodou dopadají na anodu a způsobují vznik měkkého röntgenového záření. To způsobí sekundární emisi elektronů na kolektoru a vznik fotoproudu. Ten nelze odlišit od proudu dopadajících iontů. O velikosti fotoproudu rozhoduje plocha kolektoru. Proto byly vyvinuty ionizační vakuometry se žhavenou katodou s velmi malou plochou kolektoru [4].

4.4.1 Bayardův - Alpertův ionizační vakuometr

U tohoto typu vakuometru je kolektor z tenkého drátu umístěn v ose celého systému. Kolem něj je spirálovitá anoda. Žhavená katoda zde zastává funkci vnější elektrody. Tím se proud fotoelektronů snižuje na hodnotu odpovídající přibližně tlaku 10^{-9} Pa, přičemž citlivost je přibližně stejná jako při obvyklém konstrukčním uspořádání. Změnou plochy kolektoru se sice zmenší jeho odsávací účinnost, změnou uspořádání elektrod se však zvýší účinná dráha elektronu. Při použití kolektoru u průměru $4 \mu\text{m}$ se dolní hranice posouvá do řádu 10^{-10} Pa. Důležitou rolí u takto nízkých tlaků hraje tlak nasycených par materiálu katody. Velmi nízké tlaky se měří vakuometry s katodou ze speciálního materiálu (např. hexaborid lanthanu LaB_6). Schématické znázornění Bayardova - Alpertova ionizačního

vakuometru je na obr (4.13) [2, 4, 5].



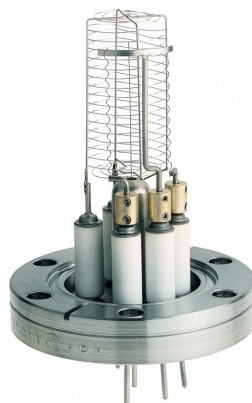
(a) Schématické znázornění Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru [Převzato s úpravami z [4]]



(b) Příklad skutečného provedení Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru [Převzato z [20]]

Obr. 4.13: Schématické znázornění a skutečné provedení Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru

Je velmi důležité, aby se při měření ionizačním vakuometrem se žhavenou katodou zabránilo vniknutí vzduchu do aparatury, neboť by žhavené vlákno katody okamžitě shořelo. Postupně však stejně dochází k postupnému odpařování materiálu vlákna a po čase musí být tato měřka vyměněna. Tato měřka se běžně používá k měření tlaků v rozmezí 10^{-1} – 10^{-6} Pa. Po speciálních úpravách lze použít k měření tlaku až do hodnoty 10^{-10} Pa [2, 4].



Obr. 4.14: Další varianta provedení Bayardova - Alpertova ionizačního vakuometru [Převzato z [20]]

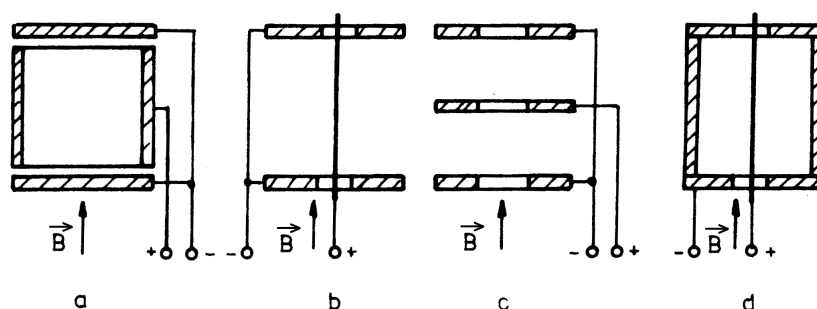
4.5 Výbojové vakuometry

Tento druh vakuometrů využívá závislosti různých parametrů výboje ve zředěném plynu na tlaku. V těchto případech se vždy jedná o samostatné elektrické výboje, kde k ionizaci molekul plynu dochází bez speciálního ionizačního prostředku, jakým je např. termoemise elektronů u žhavené katody. Počet elektronů, kladných a záporných iontů vzniklých ve výboji závisí na koncentraci plynu, z čehož vyplývá, že na ní závisí i výboj a jeho charakteristiky, proud procházející výbojovým prostředím a záření výboje. Jejich charakteristiky je tedy možno použít na měření tlaku. Protože je základním procesem ionizace atomů a molekul, všechny charakteristiky závisí kromě tlaku i na složení měřeného plynu [2, 4, 5].

4.5.1 Ionizační vakuometr se studenou katodou

4.5.1.1 Penningův (magnetronový) vakuometr

Existují dva typy těchto vakuometrů. První vynalezl holandský fyzik Frans Michel Penning. Nazývá se Penningův vakuometr, ale je znám též jako magnetronový vakuometr. Jeho princip spočívá v měření koncentrace plynu (a tedy i tlaku) prováděném pomocí ionizace molekul plynu. Sestává ze dvou studených deskových navzájem propojených elektrod, mezi nimiž je anoda ve tvaru válce. V dnešní době však již existuje spousta modifikací tohoto konstrukčního uspořádání. Na katodu se přivádí vysoké napětí v řádu kV, které vyrazí z katody elektrony a ty putují prostorem k anodě. Emitované elektrony naráží během putování prostorem na molekuly plynu a vytváří v plynu ionizovaný proud. Ten přímo souvisí s koncentrací molekul plynu a jeho hodnota je měřena. Pro zvýšení pravděpodobnosti srážek emitovaných elektronů s molekulami plynu jsou elektrony umístěny v silném magnetickém poli o magnetické indukci přibližně 10^{-2} T, které je nutí kroužit po spirálních drahách. Siločáry magnetického pole jsou kolmé na deskové elektrody a rovnoběžné s osou anody. Toto magnetické pole však nemá skoro žádný vliv na dráhu vzniklých iontů vzhledem k jejich relativně velké hmotnosti. Ty tedy dopadají na anodu a vytváří měřený proud [2, 4, 5].



Obr. 4.15: Schématické znázornění Penningova vakuometru (a) a různé modifikace konstrukčního uspořádání (b, c, d) |Převzato z [4]|

Pro proud tekoucí touto soustavou platí vztah:

$$I = konst \cdot p^y \quad (4.11)$$

kde se hodnota exponentu y pohybuje v intervalu od 1 do 1,4. Při vyšších hodnotách magnetického pole se jeho hodnota blíží k jedné.

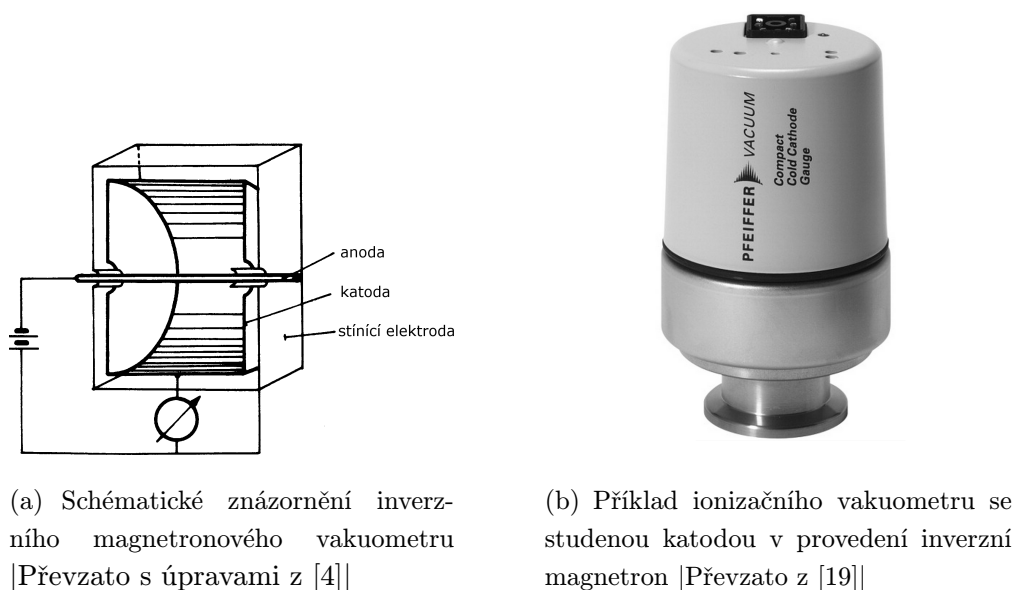
Horní hranice pro měření tímto vakuometrem je přibližně 1 Pa. Při tomto tlaku se mění celý mechanismus výboje, neboť se mění rozložení elektrického pole v měrce. Tuto hranici lze odstranit např. změnou polaritý elektrod, čímž se z tohoto vakuometru stane v podstatě obyčejná výbojka. Další možností pro posun horní hranice pro měření je odstranění magnetického pole. Dolní hranici pro měření lze posunout vhodnou volbou elektrického a magnetického pole nebo zvětšením geometrických rozměrů, v kterých hoří výboj. V oblasti velmi nízkých tlaků začne však tuto hranici limitovat proud autoemisních elektronů katod z míst ostrých hrotů a hran. Je tedy vhodné použít katody bez těchto problematických míst [2, 4, 5].

Konstrukce navrhnutá podle P. A. Readheada, který se zabýval řešením problému autoemise, se nazývá magnetronový vakuometr se stínícími elektrodami. Rozdíl v konstrukci tkví především v tom, že vakuometr obsahuje navíc k anodě a katodě ještě pomocnou elektrodu. Anoda má tvar válce, ve kterém jsou otvory pro snadné pronikání molekul plynu do prostoru uvnitř. Katoda má opět tvar dvou desek, které jsou uprostřed vodivě spojeny. Mezi anodu a katodu jsou vloženy dvě pomocné elektrody ve tvaru prstence, jejichž funkce spočívá ve stínění katody od silného elektrického pole. Všechny elektrody jsou v magnetickém poli o magnetické indukci přibližně 0,1 T. Na anodě je napětí cca 6 kV, kdežto na katodě a pomocné elektrodě je potenciál země. Jelikož je měřicí přístroj zařazen pouze v obvodu katody, z měření je vyloučen autoemisní proud. S využitím tohoto principu lze měřit tlaky až do 10^{-11} Pa [2, 4, 5].

4.5.1.2 Inverzní magnetronový vakuometr

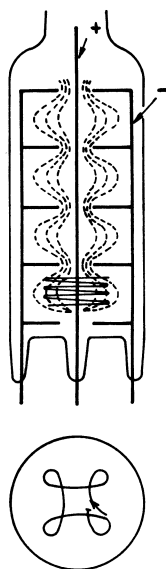
Dalším typem ionizačního vakuometru se studenou katodou je inverzní magnetronový vakuometr, který navrhli J.P.Hobson a P.A.Readhead. Rozdíl v konstrukci měřky typu Penning a inverzního magnetronu spočívá především ve vzájemném uspořádání elektrod. Anoda má tyčový tvar a je umístěna v ose elektrodového systému. Katoda má tvar válce uzavřeného víky, v jejichž středu jsou otvory. Obě elektrody jsou umístěny v pomocné elektrodě ve tvaru krychle, která má stínící funkci a slouží k vyloučení autoemisního proudu. Pomocná elektroda má na čelech otvory pro průchod anody a nástavce ve tvaru trubiček, které mají za úkol stínit katodu v místě její nejmenší vzdálenosti od anody. Napětí mezi anodou a katodou je přibližně 6 kV. Celý systém je v magnetickém poli o indukci asi 0,2 T. Pomocná elektroda je na potenciálu katody. Aby se v měření neprojevil autoemisní proud, musí být měřicí přístroj opět zařazen pouze v obvodu katody. Díky použití pomocné (stínící) elektrody se výrazně zvyšuje citlivost měřky. Inverzní magnetron je vhodný pro měření tlaků v rozmezí $10^{-1} - 10^{-10}$ Pa. Schématické znázornění této

konstrukce je na obr. (4.16) [2, 4, 5].



Obr. 4.16: Schématické znázornění a skutečné provedení inverzního magnetronového vakuometru

Zvýšení rozsahu lze rovněž provést konstrukcí podle obr. (4.17). Katoda je v tomto případě rozdělena na několik komor, anodu tvoří drát a je umístěna v ose válce. Napětí mezi oběma elektrodami je opět v řádu kV. S využitím tohoto konstrukčního uspořádání lze měřit tlaky v rozsahu $1 - 10^{-6}$ Pa [4].



Obr. 4.17: Schématické znázornění výbojového vakuometru s více komorami [Převzato z [4]]

V oblasti velmi nízkých tlaků způsobuje problém nastartování výbojových vakuometrů. Pokud v této oblasti dojde k zhasnutí výboje, nemusí se podařit ho znovu nastartovat za stejného tlaku. K zapálení výboje dojde jen tehdy, pokud zvýšíme tlak ve vakuovém

systemu. Toto chování se nazývá hysterezí. Pro rychlé zapálení výboje bez nutnosti zvyšovat tlak se vakuometry vybavují pomocnou hrotovou nebo žhavenou elektrodou, která autoemisí resp. termoemisí umožní rychlé spuštění vakuometru [2, 4].

Výhodou ionizačního vakuometru se studenou katodou je, že díky absenci žhavení katody není náchylný na možné vniknutí vzduchu do aparatury. Tyto vakuometry mají široký rozsah měření, jednodušší měřicí obvody a vysokou citlivost. Potřebují však na rozdíl od ionizačních vakuometrů se žhavenou katodou pro svou činnost magnet, což je činí mohutnějšími. Teploty elektrod jsou nízké, takže nenastává ohraničení dolní hranice měření tlakem nasycených par materiálů, jež byly použity pro konstrukci elektrod [2, 4, 5].

5

Vakuová měrka Pfeiffer PKR 251

Tato vakuová měrka je produktem firmy PFEIFFER VACUUM. Řadí se do rodiny ActiveLine, což jsou zařízení s analogovým výstupem. Využívá kombinace dvou separátních měřících metod pro zajištění velkého měřícího rozsahu, a to konkrétně měření pomocí Piraniho termočlánku a ionizačního vakuometru se studenou katodou (v provedení inverzní magnetron). Oba měřící systémy jsou spojeny tak, že na výstupu je jeden jednotný signál. Chovají se tedy jako jeden měřící systém. Měřící obvod Piraniho termočlánku je vždy aktivní. Měřící obvod se studenou katodou je kontrolován obvodem Piraniho termočlánku a aktivuje se při tlaku menším než 1 Pa. Je schopna měřit tlaky v rozsahu od $5 \cdot 10^{-7}$ Pa do $1 \cdot 10^5$ Pa. Jelikož se v originální dokumentaci od výrobce pracuje převážně s jednotkami mbar, občas jsou použity i v této kapitole. Převodní vztah je však jednoduchý. Platí: 1 mbar = 100 Pa.

Výstupní napětí vakuové měrky se pohybuje v rozsahu 0 - 10,5 V. Závislost napětí na tlaku má logaritmický charakter. Při zvýšení napětí o 0,6 V vzroste hodnota tlaku o dekádu. Při standardním měření se velikost výstupního napětí pohybuje v rozsahu 1,8 - 8,6 V. Při rozdílných hodnotách se pohybujeme mimo měřící rozsah měrky. Okrajové hodnoty výstupního stejnosměrného napětí jsou vyhrazeny pro indikaci chyb. Pokud je hodnota výstupního napětí menší než 0,5 V, měrka není napájena. V případě, že je výstupní napětí větší než 9,5 V, měrka indikuje vadu Piraniho senzoru (zřejmě došlo k přerušení žhaveného vlákna). Výrobce uvádí v manuálu k obsluze [12] vztah pro přepočtení naměřeného napětí na tlak ve vakuovém systému.

$$p = 10^{1,667 \cdot U - d} \quad (5.1)$$

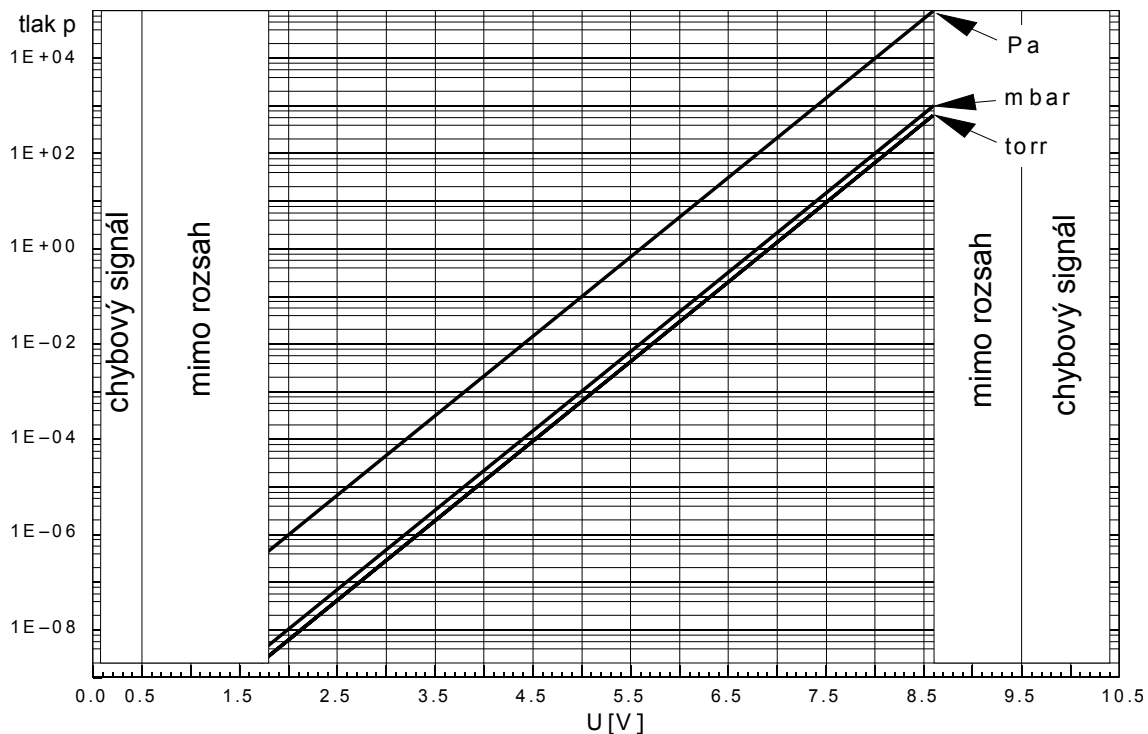
Symbol d zde značí konstantu, jejíž hodnota závisí na požadovaných jednotkách, v nichž chceme tlak vyčíslit. V tabulce (5.1) jsou hodnoty konstanty d pro nejčastěji používané jednotky tlaku.

Závislost tlaku v systému na velikosti výstupního napětí je na obr (5.1).

Jelikož oba měřící systémy používají nepřímé metody měření tlaku, je měřená hodnota závislá na typu plynu ve vakuovém systému. Závislosti naměřeného tlaku v mbar na efektivním (skutečným) tlaku v systému p_{eff} jsou na obr (5.2) a obr (5.3). Zobrazená

	mbar	Pa	Torr
d	11,33	9,33	11,46

Tab. 5.1: Hodnoty konstanty d ze vztahu (5.1) pro nejčastěji používané jednotky tlaku
|Převzato z [12]|



Obr. 5.1: Závislost tlaku na výstupním napětí |Převzato s úpravami z [12]|

hodnota je přesná pro suchý vzduch, N_2 , O_2 a CO . V rozsahu pod 10^{-5} mbar (10^{-3} Pa) jsou závislosti lineární. Pro jiné plyny, než je vzduch, lze tedy hodnotu tlaku určit podle následující rovnice [12]:

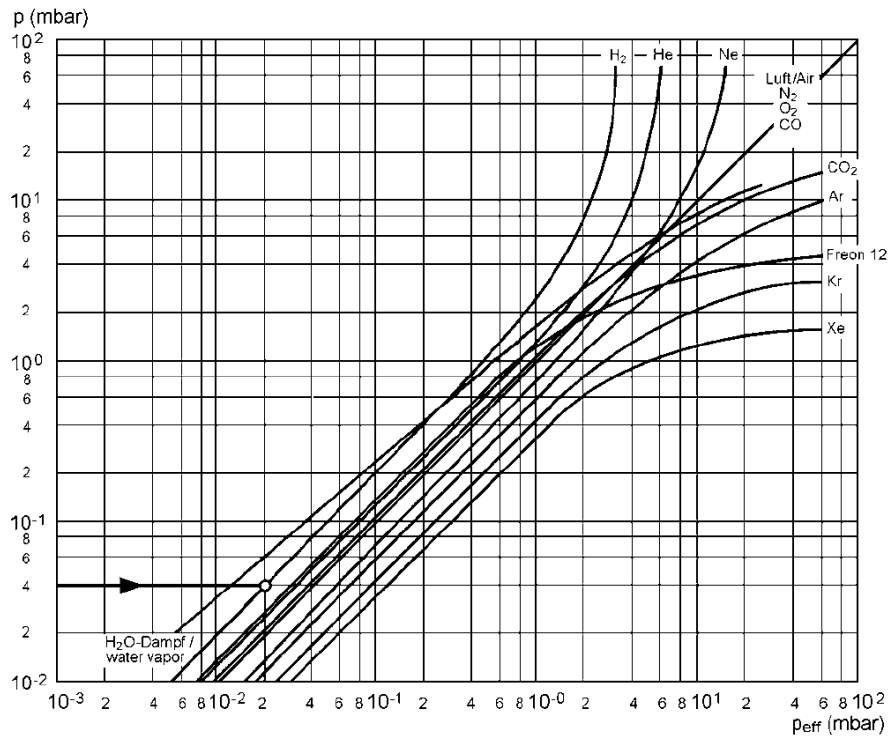
$$p_{eff} = K \cdot \text{namerena hodnota tlaku} \quad (5.2)$$

Hodnoty konstanty K pro různé plyny udává tabulka (5.2).

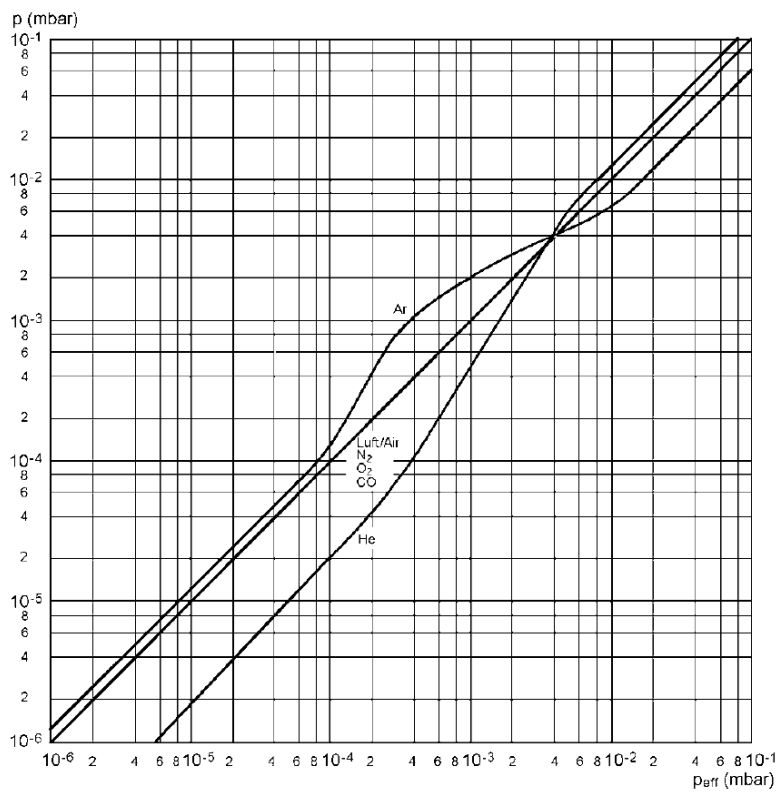
druh plynu	vzduch (N_2 , O_2 , CO)	Xe	Kr	Ar	H_2	Ne	He
K	1,0	0,4	0,5	0,8	2,4	4,1	5,9

Tab. 5.2: Hodnoty konstanty K ze vztahu (5.2) pro různé plyny |Převzato z [12]|

Vakuová měřka Pfeiffer PKR 251 díky vhodné kombinaci dvou měřících metod a tak i zajištění velkého měřícího rozsahu jistě najde uplatnění v mnoha technických aplikacích. Její cena se na trhu pohybuje okolo 28 000 Kč.



Obr. 5.2: Závislost naměřeného tlaku na tlaku efektivním v měřicím rozsahu nad 10^{-2} mbar (aktivní je jen obvod s Piraniho vakuometrem) [Převzato z [12]]



Obr. 5.3: Závislost naměřeného tlaku na tlaku efektivním v měřicím rozsahu od 10^{-6} do 0,1 mbar [Převzato z [12]]

6

Konstrukce vyhodnocovací jednotky

6.1 Schéma zapojení

Kompletní schéma zapojení je kvůli své velikosti umístěno v příloze A. V této podkapitole jsou vysvětleny funkce jednotlivých částí schématu.

6.1.1 Napájecí obvod

V manuálu k obsluze vakuové měrky Pfeiffer PKR 251 uvedeno, že stejnosměrné napájecí napětí musí být v rozsahu 16 - 30 V (podle délky kabelu), k napájení DPS byl tedy zvolen stabilizovaný síťový adaptér na 24 V. Napájení měrky je připojeno přes pojistku dle doporučení výrobce. Dioda 1N4007 je zapojena před spojitým stabilizátorem napětí 7810 proto, aby se na ní vytvořil úbytek napětí a zmenšila tak vstupní napětí stabilizátoru 7810. Dva stabilizátory (7810 a 7805) jsou použity z podobného důvodu zajištění rozdělení vzniklého ztrátového výkonu mezi dvě součástky. Tyto opatření byly provedeny, neboť se při návrhu počítalo s uložením zařízení do konstrukční krabičky bez použití ventilátoru.

LCD displej dohromady pro podsvěcovací LED i napájení logických obvodů odebírá 80 mA. Mikrokontrolér ATmega16 při použití vnitřního RC oscilátoru na frekvenci 1 MHz odebírá 1,7 mA [3], LED diodou pro indikaci napájení teče 10 mA, proud nulovým pinem stabilizátoru 7810 je 8 mA, stabilizátoru 7805 6 mA. Proud tekoucí trimrem pro nastavení kontrastu LCD displeje není uvažován, neboť při použitém trimru o hodnotě 50 k Ω je jeho hodnota velice nízká. Proud pro napájení vakuové měrky rovněž není uvažován, neboť neteče přes tento napájecí obvod. Dohromady tedy bude odběr přibližně 106 mA. Při absenci diody a použití samotného stabilizátoru 7805 by na něm tak mohl vzniknout ztrátový výkon:

$$P_{Z_{7805}} = (U_1 - U_2) \cdot I_{max} = (24 - 5) \cdot 0,106 = 2 \text{ W} \quad (6.1)$$

Na diodě 1N4007 je při průchodu proudu 100 mA úbytek přibližně 0,7 V. Při předřazení této diody se vstupní napětí stabilizátoru 7810 sníží:

$$U_1 = 24 - 0,7 = 23,3 \text{ V} \quad (6.2)$$

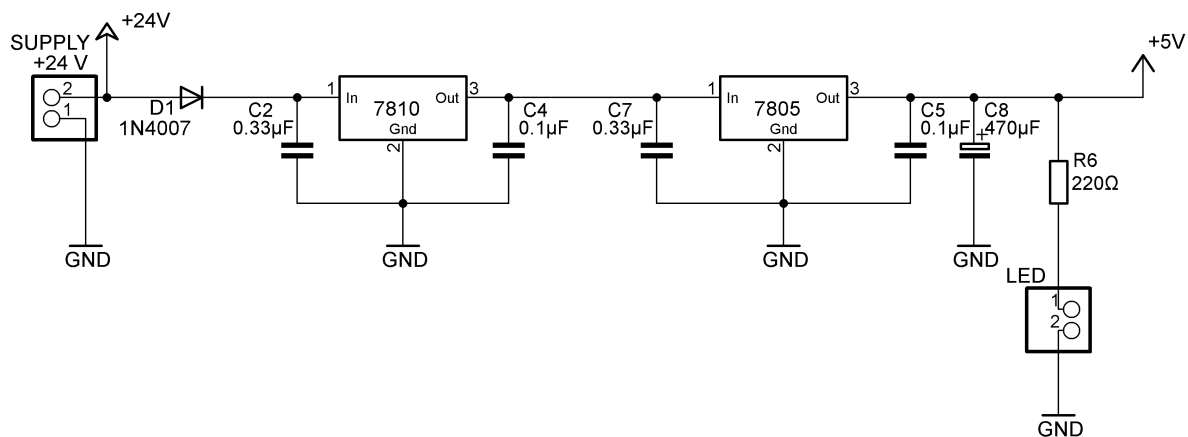
Ztrátový výkon na stabilizátoru 7810 tedy bude:

$$P_{Z_{7810}} = (U_1 - U_2) \cdot I_{max} = (23,3 - 10) \cdot 0,106 = 1,41 \text{ W} \quad (6.3)$$

Na stabilizátoru 7805 bude ztrátový výkon:

$$P_{Z_{7805}} = (U_1 - U_2) \cdot I_{max} = (10 - 5) \cdot 0,106 = 0,53 \text{ W} \quad (6.4)$$

Schéma napájecího obvodu je na obr. 6.1. Zelená LED dioda je určena k indikaci napájení obvodu a je umístěna na předním panelu celého zařízení.



Obr. 6.1: Napájecí obvod

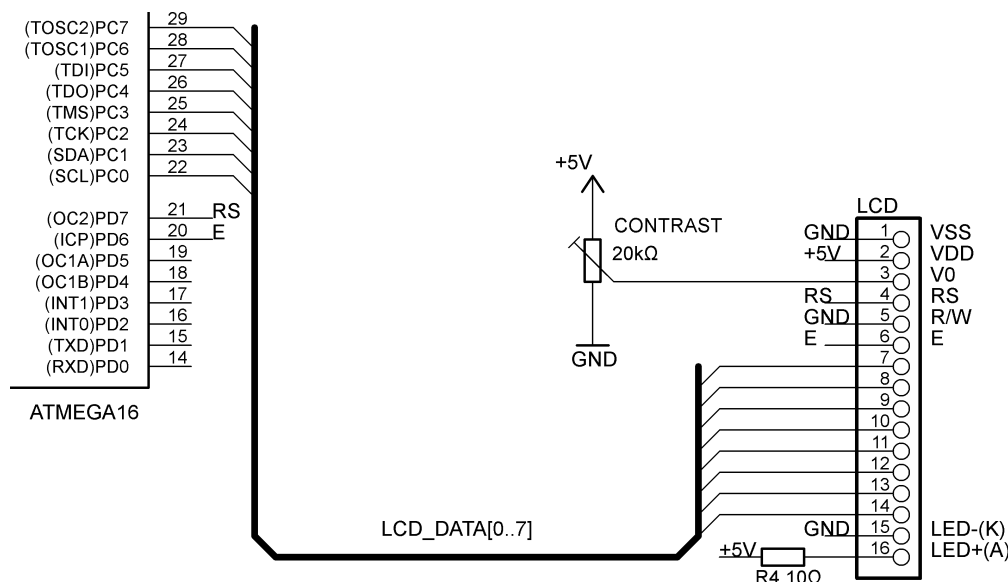
6.1.2 Komunikace s LCD displejem

Pro zobrazení výsledků jsem se rozhodl zvolit dvouřádkový LCD displej s řadičem S6A0069 o šestnácti znacích MC1602E-SYL/H. Díky nenáročnosti aplikace na počet pinů mikrokontroléru jsem se rozhodl pro osmibitovou komunikaci. Datové piny jsou tedy zapojeny na port C, řídicí pin RS (výběr přenosu dat a příkazu) je na pinu PD7 a řídicí pin E (povolovací vstup) na pinu PD6. Jelikož se do displeje pouze zapisuje, je pin R/\overline{W} (čtení/zápis) natrvalo uzemněn. Zapojení vývodů displeje je v tabulce 6.1. Schéma připojení LCD displeje k mikrokontroléru je na obr (6.2).

Po zapnutí mikrokontroléru a displeje je nutné provést základní inicializaci displeje. Nastaví se počet bitů datové komunikace, směr psaní znaků, posun řádku, (ne)povolí se kurzor a nastaví se jeho počáteční pozice a případné blikání. Po této inicializaci je displej připraven na komunikaci. Každý znak je zobrazován jako matice 5x8 bodů. Data, která se mají zobrazit jsou uložena v paměti DDRAM (Display Data Random Acces Memory). Každý zobrazovaný znak má svojí adresu. U dvouřádkových displejů o šestnácti znacích zpravidla první řádek začíná adresou 00h a druhý řádek adresou 40h. Ve skutečnosti je adresa posazena o 80h, protože u příkazu pro nastavení adresy je bit D7 (MSB) vždy nastaven do logické jedničky a bity D6 až D0 obsahují vlastní adresu v DDRAM. Hodnota pro první řádek první znak je tedy 80h pro druhý řádek první znak je C0h.

pin	název	popis
1	V _{ss}	zem (0 V)
2	V _{dd}	napájecí napětí (4,75 až 5,25 V)
3	V _o	nastavení kontrastu displeje (typicky 0,4 V)
4	RS	řídící signál Register Select
5	R/ \overline{W}	řídící signál Read/Write
6	E	řídící signál Enable
7 - 14	DB0 - DB7	datová sběrnice
15	A	anoda podsvětlovací LED diody
16	K	katoda podsvětlovací LED diody

Tab. 6.1: Zapojení vývodů displeje MC1602E-SYL/H [Převzato z [11]]



Obr. 6.2: Schéma připojení LCD displeje k mikrokontroléru

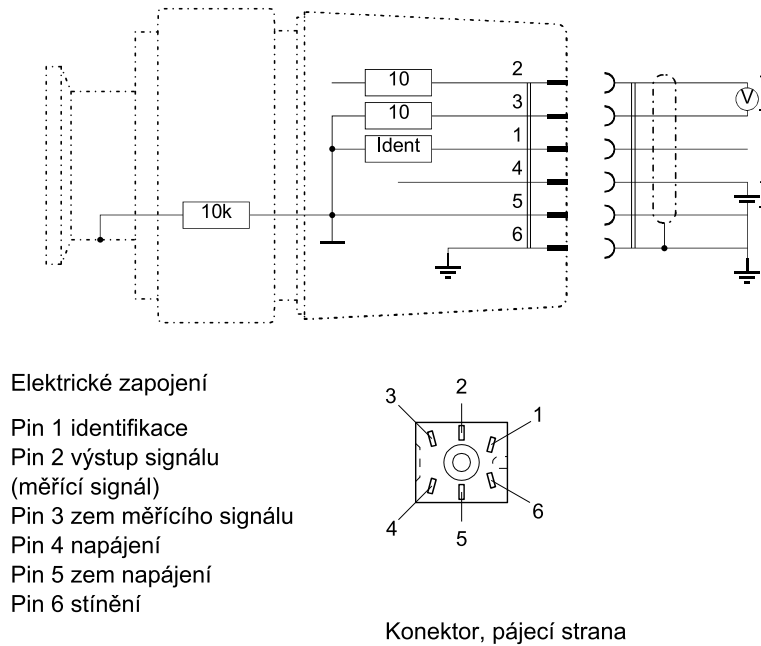
Po inicializaci se tedy nastaví požadovaná adresa v DDRAM ($RS = 0$, $R/\overline{W} = 0$, $D7 = 1$, na $D6$ až $D0$ je požadovaná adresa) a vše se potvrdí změnou stavu řídicího signálu E z logické jedničky do logické nuly. Poté se vyšlou data ($RS = 1$, $R/\overline{W} = 0$, na $D7$ až $D0$ jsou data k odeslání) a vše se opět potvrdí změnou stavu řídicího signálu E z logické jedničky do logické nuly.

Seznam všech příkazů je uveden v katalogovém listu k řadiči S6A0069 [10]. Pro práci s LCD displejem jsem si vytvořil knihovnu LCD.h (viz E.2).

6.1.3 Připojení vakuové měřky Pfeiffer PKR 251

Jelikož dává měřka na svém výstupu měřící signál v rozsahu 0 - 10,5 V (viz 5) a jako reference pro A/D převodník slouží AVCC (analogové napájení +5 V), velikost snímaného napětí na vstupu A/D převodníku nesmí překročit 5 V. Proto je měřka připojena měři-

cím signálem na pin mikrokontroléru ADC0 přes odporový dělič s poměrem 1:1 složený ze dvou odporů o hodnotě $10\text{ k}\Omega$. Druhý vývod je připojen na analogovou zem AGND a slouží jako zem pro měřicí signál. Třetí vývod slouží pro identifikaci a v mé aplikaci je nezapojen. Jelikož nemá měřka vlastní nezávislé napájení, je pro tuto funkci vyhrazen čtvrtý vývod připojený k napájení přes pojistku (viz 6.1.1). Zbylé dva vývody jsou připojeny na číslicovou zem GND. První plní funkci země pro napájení měřky a druhý stínění. Měřka je zapojena přes šestipinový konektor Hirschmann compact connector type GO 6. Elektrické zapojení uvnitř vakuové měřky a popis vývodů je na obr. (6.3).



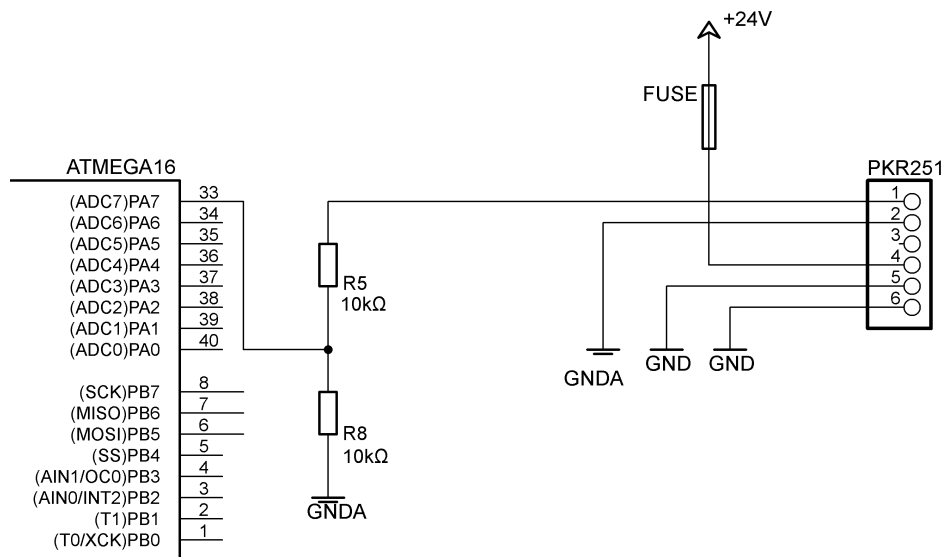
Obr. 6.3: Elektrické zapojení uvnitř měřky a popis vývodů konektoru | Převzato s úpravami z [12]

6.1.4 Popis ostatních částí schématu

Kondenzátory C_6 , C_8 a C_{10} na schématu slouží k blokování napájení. Propojení analogové a číslicové země je realizováno přes SMD odpor o hodnotě $0\ \Omega$. Dle doporučení z katalogového listu je analogové napájení spojeno s napájením číslicových obvodů přes filtrační LC článek (L , C_3), aby se zabránilo pronikání rušení z číslicové části obvodu, a vývod AREF je k analogovému napájení připojen přes kondenzátor C_9 . K vývodu $\overline{\text{RESET}}$ je přes odpor R_7 připojen kondenzátor C_1 , který lze zkratovat při stisknutí tlačítka na předním panelu a provést tak reset mikrokontroléru.

6.2 Použitý mikrokontrolér ATmega16

Jako řídicí prvek jsem se rozhodl zvolit mikrokontrolér ATmega16 z rodiny AVR od výrobce Atmel. Jedná se o nízkopříkonový osmibitový mikrokontrolér založený na rozšířené



Obr. 6.4: Schéma připojení vakuové měřky k mikrokontroléru

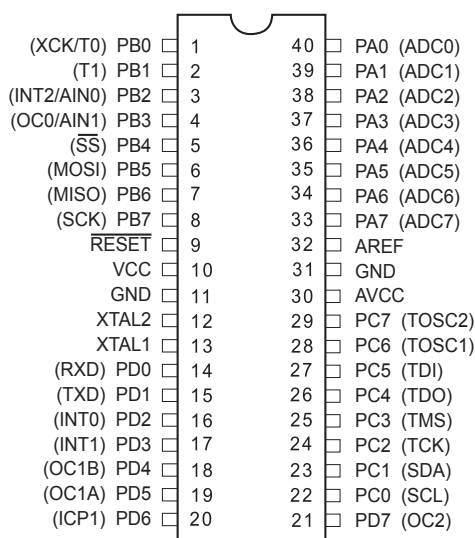
architektuře AVR RISC. Díky provádění výkonných instrukcí v jednom hodinovém cyklu dosahuje 1 MIPS (Million Instruction Per Second) na 1 MHz.

6.2.1 Základní vlastnosti

Tento osmibitový mikrokontrolér obsahuje 16 kB Flash paměti sloužící jako paměť programu, 1kB RAM datové paměti a 512 B EEPROM paměti pro případnou zálohu důležitých dat, přičemž Flash a EEPROM jsou programovatelné přímo v systému (ISP - In System Programming) pomocí rozhraní SPI nebo JTAG. Jeho instrukční soubor se skládá z 131 instrukcí. Obsahuje 32 registrů GPR (General Purpose Register) délky 8 bitů. Dále je vybaven čtyřmi 8bitovými vstupně/výstupními porty, dvěma 8bitovými čítači/časovači, jedním 16bitovým čítačem/časovačem, čtyřmi PWM kanály, osmi multiplexovanými kanály (7 diferenčními) 10bitového A/D převodníku pracujícího na principu postupné aproximace, programovatelným sériovým rozhraním USART, sériovým periferním rozhraním SPI, sériovým rozhraním TWI, zajišťujícím komunikaci s periferními obvody ve stylu I²C, programovatelným obvodem Watchdog a analogovým komparátorem. Mikrokontrolér ATmega16 je vybaven zabudovaným kalibrovaným RC oscilátorem, na vstupy XTAL je však možno připojit krystal a to až o kmitočtu až 16 MHz. Vyrábí se v pouzdech DIP, MLF a TQFP [3]. Pro svou aplikaci jsem zvolil pouzdro DIP. Rozložení vývodů je na obr. (6.5).

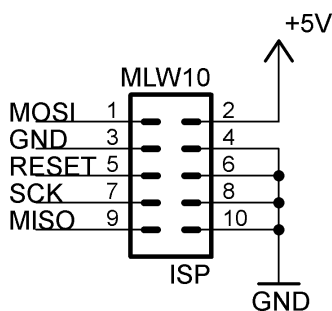
6.2.2 Naprogramování mikrokontroléru

Mikrokontrolér ATmega16 byl naprogramován přímo v systému (ISP) pomocí sériového rozhraní SPI. Zdrojový kód byl vytvořen v prostředí Atmel Studio 6, do mikrokontroléru byl program nahrán s využitím programátoru USBasp a programu Khazama AVR programmer. Zapojení ISP konektoru je na obr. (6.6). Vytvořený zdrojový kód je umístěn v



Obr. 6.5: Rozložení vývodů mikrokontroléru ATmega16 v pouzdře DIP [Převzato z [3]]

příloze E.



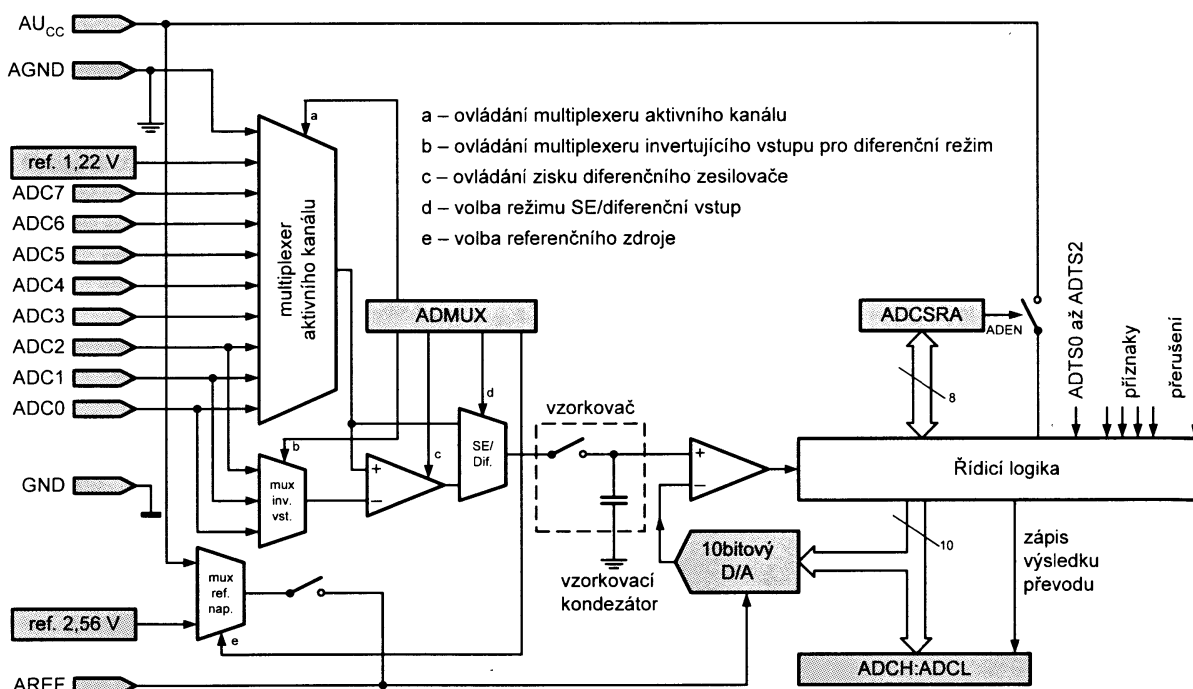
Obr. 6.6: Zapojení ISP konektoru

6.2.3 A/D převodník

Mikrokontrolér ATmega16 obsahuje 10bitový A/D převodník pracující na principu postupné aproximace. A/D převodník je připojen na analogový multiplexer, takže je možno snímat až 10 vstupů (včetně zabudované reference 1,22 V a analogové nuly). Signál lze sledovat i diferencně. A/D převodník obsahuje vzorkovač spojený se zesilovačem, čímž je při převodu udržována konstantní hodnota navzorkovaného napětí. Analogové napájení je spojeno s číslicovým přes filtrační LC článek. Analogová zem AGND je spojena se zemí číslicovou (GND) pouze v jediném bodě. Blokové schéma A/D převodníku je na obr. (6.7).

6.2.3.1 Základní parametry A/D převodníku

Jak již bylo uvedeno jedná se o 10bitový A/D převodník (je však možno pracovat i s rozlišením 8 bitů). Výrobce dále garantuje tyto parametry: integrální nelinearita 0,5 LSB, absolutní chyba 2 LSB, doba převodu 65 až 260 μs , rychlost převodu až 15 kSPS, 8

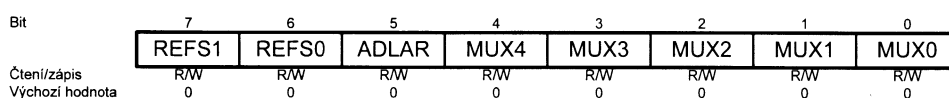


Obr. 6.7: Blokové schéma A/D převodníku [Převzato z [7]]

multiplexovaných vstupních kanálů v provedení SE, 7 diferenciálních vstupních kanálů, 2 diferenciální vstupní kanály s volitelným ziskem 10x nebo 200x (testováno jen na pouzdech TQFP), volitelná zabudovaná reference 2,56 V, režimy jednoduchý převod, automatické spouštění či volný běh, přerušení po dokončení převodu, možnost spouštět A/D převodník pomocí dalších přerušení, potlačovač šumu v režimu Idle či ADC Noise Reduction [3, 7].

6.2.3.2 Popis činnosti A/D převodníku, řídicích registrů a jejich nastavení

A/D převodník převádí vstupní analogové napětí na 10bitovou číslicovou hodnotu algoritmem postupné aproximace. Minimum je reprezentováno GND, maximum AREF - 1 LSB. Jako referenční napětí lze zvolit vnitřní referenční napětí 2,56 V (Bandgap), napětí vývodu AVCC (analogové napájení), či napětí přivedené na pin AREF z vnějšku. Vždy je nutno připojit na vývod AREF vnější blokovací kondenzátor. Volba se provádí nastavením bitů REFS0 a REFS1 v řídicím registru ADMUX (obr. 6.8). Všechny možné zdroje referenčního napětí a odpovídající nastavení bitů RES0 A REFS1 jsou uvedeny v tab. 6.2. Ve své aplikaci jsem zvolil jako referenci napětí vývodu AVCC (+5 V). Odpovídající bity jsem tedy nastavil: REFS1 = 0, REFS0 = 1.



Obr. 6.8: Řídicí registr ADMUX [Převzato z [7]]

REFS0	REFS1	zvolený zdroj referenčního napětí
0	0	AREF
0	1	AVCC
1	0	vyhrazeno
1	1	vnitřní reference 2,56 V

Tab. 6.2: Výběr referenčního napětí A/D převodníku [Převzato z [3]]

Vstupní analogové kanály a zisk se volí zápisem bitů MUX0 až MUX4 do stejného registru. Všechny vstupy (včetně vnitřní reference a AGND) lze konfigurovat jako SE (Single-Ended) a měřit napětí proti AGND. Dvojici vývodů ADC0 - ADC7 lze použít pro sledování signálu diferenčně. Pro měření jsem se rozhodl využít kanál ADC7 a navzorkované napětí měřit proti zemi. Bity MUX4 a MUX3 byly tedy nastaveny na hodnotu logické nuly. Bity MUX2 až MUX0 byly nastaveny na hodnotu logické jedničky. Možnosti výběru SE kanálů jsou uvedeny v tab. 6.3.

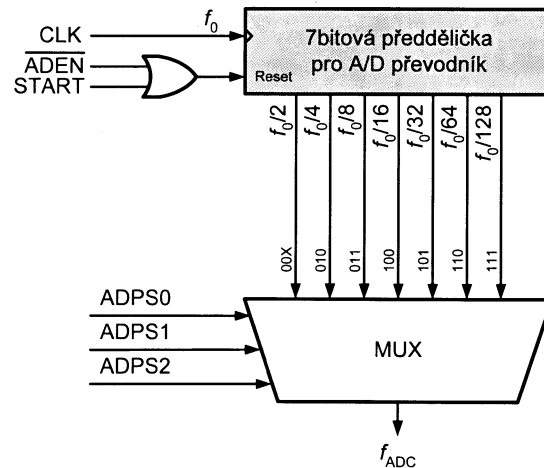
MUX4	MUX3	MUX2	MUX1	MUX0	Vybraný vstupní kanál
0	0	0	0	0	ADC0
0	0	0	0	1	ADC1
0	0	0	1	0	ADC2
0	0	0	1	1	ADC3
0	0	1	0	0	ADC4
0	0	1	0	1	ADC5
0	0	1	1	0	ADC6
0	0	1	1	1	ADC7

Tab. 6.3: Výběr SE kanálu A/D převodníku [Převzato z [3]]

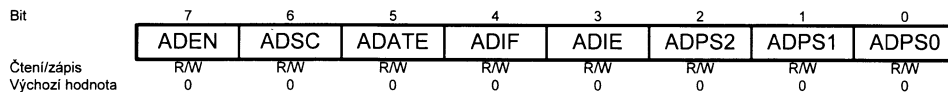
Vstupní hodinový kmitočet pro dosažení maximální přesnosti by se měl dle doporučení výrobce pohybovat v rozmezí 50 - 200 kHz [3]. Modul A/D převodníku obsahuje předděličku (obr. 6.9), pomocí níž lze vhodný hodinový kmitočet nastavit. Dělicí poměr se volí nastavením bitů ADPS2 - ADPS0 v registru ADCSRA (obr. 6.10). Jelikož byl v této aplikaci jako zdroj synchronizačních impulzů použit vnitřní RC oscilátor na frekvenci 1 MHz, byl zvolen dělicí poměr $f_0/8$ (ADPS2 = 0, ADPS1 = 1, ADPS0 = 1). A/D převodník tedy pracuje na frekvenci 125 kHz.

Číslicové obvody uvnitř mikrokontroléru jsou zdrojem elektromagnetického rušení, které má na přesnost A/D převodníku značný vliv. Pro potlačení šumu a zvýšení přesnosti A/D převodníku platí následující doporučení:

- Analogová část mikrokontroléru a všechny analogové součástky by měly mít oddělenou zemnicí plochu na plošném spoji (nejlépe ji realizovat zvláštní vrstvou plošného spoje). Tato plocha musí být s číslicovou zemí spojena v jediném místě.



Obr. 6.9: Předdělička pro A/D převodník | Převzato z [7]

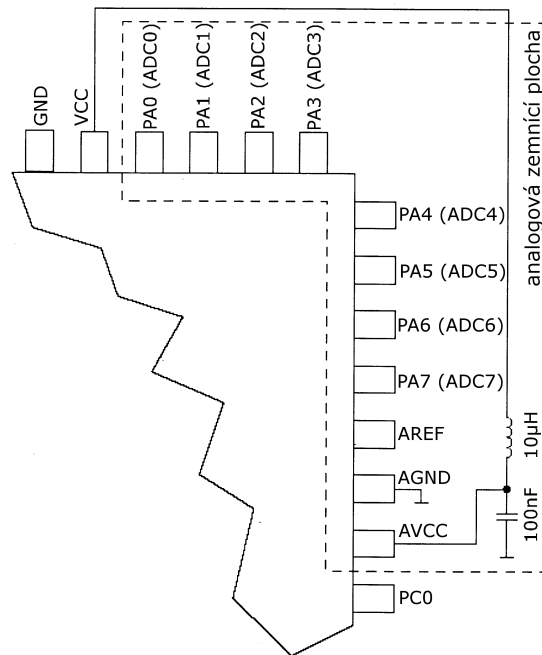


Obr. 6.10: Řídící registr ADCSRA | Převzato z [7]

- Cesty analogových signálů musí být co nejkratší. Spoje by měly vést nad analogovou stínící deskou a měly by být dostatečně vzdáleny od číslicových spojů.
- Analogové napájení (AVCC) by mělo být připojeno přes filtrační LC článek (obr. 6.11).
- Doporučuje se použít funkci ADC Noise Reduction Mode.
- Pokud musí být některé vývody brány PA použity jako číslicové výstupy, je nezbytné, aby se jejich stav v průběhu převodu neměnil.

Činnost A/D převodníku se povoluje nastavením bitu ADEN z registru ADCSRA. A/D převodník generuje po skončení převodu desetibitový výsledek, který se ukládá do dvou osmibitových registrů ADCH a ADCL. Zarovnání výsledku lze volit bitem ADLAR z registru ADMUX (obr. 6.8). Přičemž ADLAR = 0 znamená výsledek zarovnaný doprava (defaultní nastavení) a ADLAR = 1 výsledek zarovnaný doleva.

Převod lze spustit více způsoby. Zde bylo využito režimu ADC Noise Reduction Mode mikrokontroléru ATmega16 a následné obsluhy přerušení vyvolaného po skončení převodu. Princip spočívá v nastavení odpovídajících bitů v řídicím registru MCUCR. Má-li být využit jakýkoliv mód, musí se nastavit bit SE (Sleep Enable) na hodnotu logické jedničky. Odpovídající mód je poté zvolen nastavením bitů SM2 - SM0. ADC Noise Reduction Mode odpovídá nastavení SM2 = 0, SM1 = 0 a SM0 = 1. Použije-li se po tomto nastavení instrukce SLEEP, zastaví se procesor, ale A/D převodníku, externím zdrojům přerušení, čítačům/časovačům, obvodu Watchdog a sběrnici TWI je umožněno pokračovat v činnosti (pokud jsou povoleny v příslušných registrech). U A/D převodníku lze takto



Obr. 6.11: Doporučená realizace připojení A/D převodníku [Převzato z [3]]

Bit	15	14	13	12	11	10	9	8	ADCH
Čtení/zápis	–	–	–	–	–	–	ADC9	ADC8	
Výchozí hodnota	R	R	R	R	R	R	R	R	
	0	0	0	0	0	0	0	0	
Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	ADCL
Čtení/zápis	ADC7	ADC6	ADC5	ADC4	ADC3	ADC2	ADC1	ADC0	
Výchozí hodnota	R	R	R	R	R	R	R	R	
	0	0	0	0	0	0	0	0	

Obr. 6.12: Řídící registry ADCH a ADCL (ADLAR = 0) [Převzato z [7]]

zvýšit přesnost měření. Je-li povolena činnost A/D převodníku ($ADEN = 1$), ihned po vstupu do tohoto módu je zahájen převod. Po dokončení je vyvoláno přerušení a dojde k probuzení procesoru. Procesor může být v tomto módu rovněž probuzen pomocí externího resetu, resetu vyvolaného obvodem Watchdog, resetu způsobeného poklesem napájecího napětí (Brown-out reset), přerušení od TWI, přerušení od SPM/EEPROM a externího přerušení INT0 či INT1.

Po dokončení převodu lze přečíst výsledek převodu jako obsah registrového páru ADCH a ADCL. Platí [3]:

$$ADCH : ADCL = 1024 \cdot \frac{U_{vst}}{U_{ref}}, \quad (6.5)$$

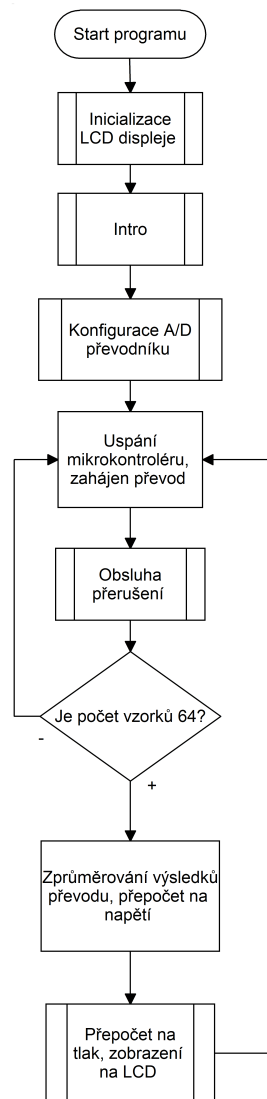
kde U_{vst} je vstupní napětí, U_{ref} je zvolené referenční napětí. Hodnota 0x0000 představuje analogovou zem, 0x03FF zvolené referenční napětí minus 1 LSB.

6.3 Realizace plošného spoje

Deska plošného spoje byla navržena v programu Eagle jako dvouvrstvá. Jsou na ní realizovány dvě zemnicí plochy (zvláště pro analogovou a číslicovou část) z obou stran, které jsou spojeny jen v jednom bodě dle doporučení z [3] (viz také obr. 6.11). Obrázky obou vrstev jsou vzhledem k jejich velikosti umístěny v příloze B.

6.4 Princip funkce vyhodnocovací jednotky

Elektronická vyhodnocovací jednotka měří pomocí A/D převodníku mikrokontroléru ATmega16 výstupní analogové napětí vakuové měrky Pfeiffer PKR 251. Bylo rozhodnuto, že tlak v systému bude zobrazován v mbar a Pa. Pro přepočítání naměřeného napětí na tlak byl využit vztah (5.1) a příslušné koeficienty z tab. 5.1. Po přepočtu je výsledek zobrazen na dvouřádkovém LCD displeji a celý proces se opakuje. Vývojový diagram je na obr. (6.13). Schéma zapojení je v příloze A, desky plošných spojů jsou v příloze B, zdrojový kód je v příloze E.



Obr. 6.13: Vývojový diagram

7

Závěr

Cílem této práce bylo zkonstruovat vyhodnocovací jednotku pro vakuovou měрку Pfeiffer PKR 251. Tato vyhodnocovací jednotka byla úspěšně realizována. Popis jednotlivých částí schématu zapojení, komunikace s LCD displejem, připojení vakuové měrky a mikrokontroléru je v kapitole 6. Další část této kapitoly se zabývá A/D převodníkem použitého mikrokontroléru ATmega16, nastavení řídicích registrů a je zde popsán princip činnosti A/D převodníku. V závěru kapitoly je probrána realizace plošného spoje a princip funkce vyhodnocovací jednotky. Schéma zapojení je v příloze A. Deska plošného spoje a osazovací výkres jsou umístěny v příloze B.

Řídicí software pro vyhodnocovací jednotku byl vytvořen v prostředí Atmel Studio 6. Program byl do mikrokontroléru nahrán pomocí programátoru USBasp a programu Khazama AVR programmer. Celý program zabírá 40% paměti Flash. Zdrojový kód je uveden v příloze E.

Fotografie realizované vyhodnocovací jednotky jsou v příloze C. Tato vyhodnocovací jednotka bude sloužit na Katedře technologií a měření v součinnosti s vakuovou měrkou Pfeiffer PKR 251 k měření tlaku ve vakuovém systému.

Simulace probíhaly na nepájivém poli. V průběhu realizace nastalo několik problematických situací. První problém se vyskytl při snahách o inicializaci LCD displeje s řadičem S6A0069. Standardně používané inicializační sekvence pro LCD displeje s řadičem HD44780 od firmy Hitachi či s řadiči na jeho bázi nefungovaly. Řadič S6A0069 je s ním však kompatibilní. Nakonec byl problém vyřešen napsáním inicializační sekvence dle katalogového listu tohoto řadiče s ponecháním delších časových prodlev.

Další problém nastal při testování A/D převodníku, resp. naměřeného napětí. Napětí 9V baterie regulované potenciometrem bylo měřeno A/D převodníkem a současně multimetrem. Při nízkých hodnotách napětí byly rozdíly mezi naměřenými hodnotami zanedbatelné. Se zvyšujícím se napětím tyto rozdíly znatelně rostly. Důvodem byl špatně spočítaný kvantizační krok A/D převodníku.

Při větších nárocích na přesnost vyhodnocovací jednotky by bylo vhodné použít vícebitový A/D převodník. Další zvýšení přesnosti by přinesl návrh děliče napětí s lepším dělicím poměrem dle teoretických rozsahů výstupních napětí z vakuové měrky. Došlo by

tak k optimalizaci vstupního napětí pro A/D převodník a tím by byl lépe využit celý jeho rozsah. Vyhodnocovací jednotka by dále mohla pomocí LED diody indikovat chybové stavy (obr. 5.1). Větší přesnosti by se jistě dosáhlo i optimalizací desky plošného spoje s důrazem na analogovou část obvodu. V době ukončení závěrečné práce bylo rozhodnuto o realizaci takovéto jednotky.

Literatura

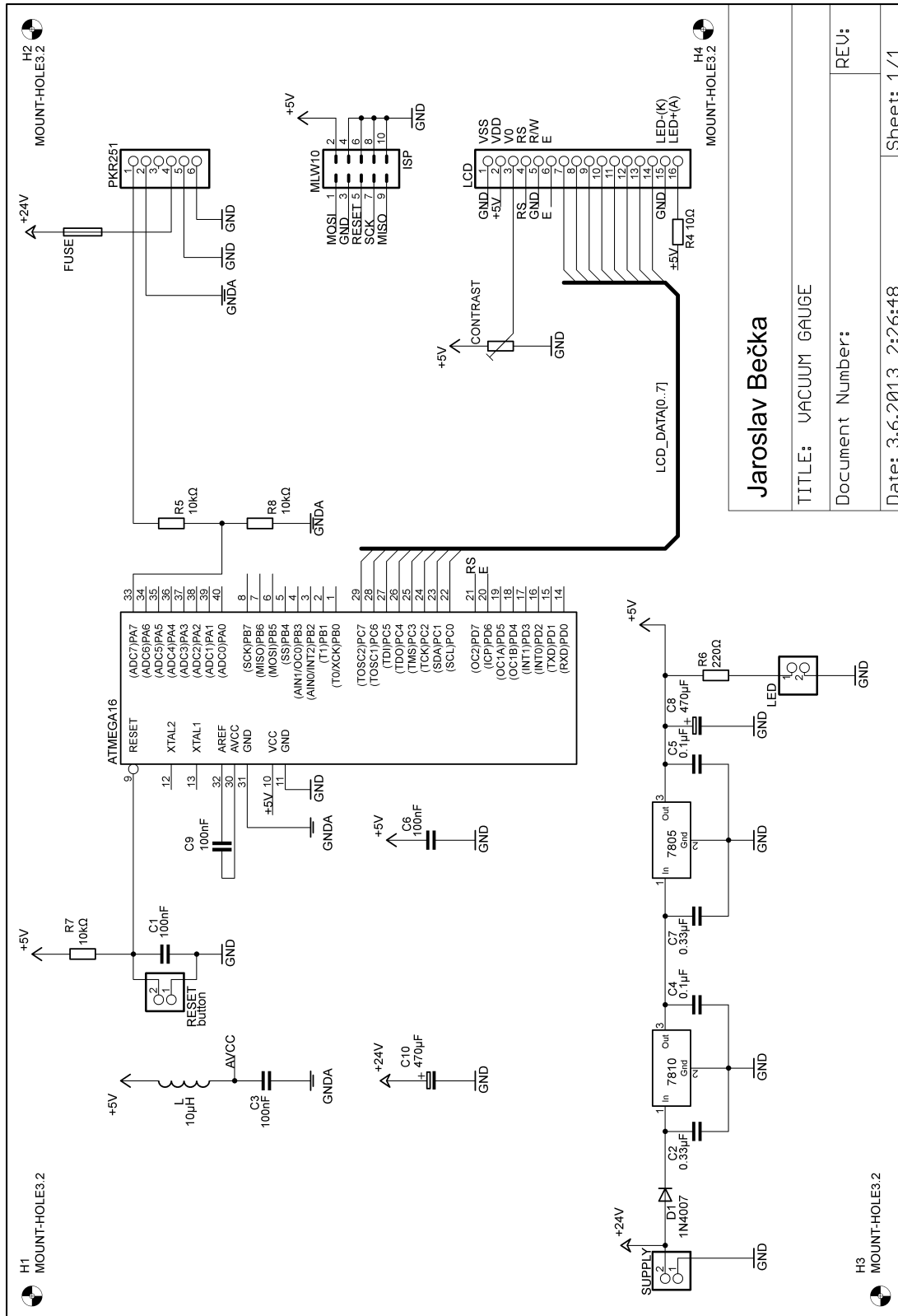
- [1] Cibulka, M., Hnědkovský, L., Hynek V. *Základní fyzikálně-chemické veličiny a jejich měření [učební text]*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. Dostupné z [www:<http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCHV_all_7.pdf>](http://www.vscht.cz/fch/cz/pomucky/FCHV_all_7.pdf)[cit. 5. 5. 2013].
- [2] Erben, M. *Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií [učební text]*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2008. Dostupné z [www:<upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf>](http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf)[cit. 27. 4. 2013].
- [3] Atmel corporation. *ATmega16 datasheet [online]*. 2010. Dostupné z [www:<http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>](http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf)[cit. 1. 6. 2013].
- [4] Dúbravcová, V. *Vákuová a ultravákuová technika*. Bratislava: Vydavatelství Alfa, 1992. ISBN 80-05-01090-7.
- [5] Mattox, Donald M. *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing: film formation, adhesion, surface preparation and contamination control*. Park Ridge: Noyes Publications, 1998. ISBN 0-8155-1422-0.
- [6] Král, J. *Cvičení z vakuové techniky*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01462-2.
- [7] Matoušek, D. *Práce s mikrokontroléry Atmel ATmega16 4. díl*. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 80-7300-174-8.
- [8] Pinker, J. *Mikroprocesory a mikropočítače*. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-110-1.
- [9] Mann, B. *C pro mikrokontroléry: ANSI-C, kompilátory C, spojovací programy - linkery, práce s ATMEL AVR a MSC-51, příklady programování v jazyce C, nástroje pro programování, tipy a triky*. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-077-6.
- [10] Samsung electronics. *S6A0069 datasheet [online]*. 2000. Dostupné z [www:<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SamsungElectronic/mXruzuq.pdf>](http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/SamsungElectronic/mXruzuq.pdf)[cit. 1. 6. 2013].

- [11] Everbouquet. *MC1602E-SYL/H datasheet [online]*. 2000. Dostupné z [www:<http://www.gme.cz/dokumentace/513/513-109/dsh.513-109.1.pdf>](http://www.gme.cz/dokumentace/513/513-109/dsh.513-109.1.pdf) [cit. 1. 6. 2013].
- [12] PFEIFFER VACUUM. *Compact FullRange Gauge PKR251 operating instructions [online]*. 2008. Dostupné z [www:<http://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/TG04_TECHNICAL/manuals/bg805155be_b_web.pdf>](http://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/TG04_TECHNICAL/manuals/bg805155be_b_web.pdf) [cit. 27. 5. 2013].
- [13] Roth, A. *Vacuum technology / edition A. Roth*. Amsterdam : Elsevier Science B.V., 1990. ISBN 0-444-88010-0.
- [14] *Tenké vrstvy [online prezentace]*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. Dostupné z [www:<http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel.1.pdf>](http://www.ateam.zcu.cz/tenke_vrstvy_fel.1.pdf) [cit. 16. 5. 2013].
- [15] Ekrt, O. *Technologie a vlastnosti tenkých vrstev, tenkovrstvé senzory [učební text]*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z [www:<http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/05_TechnologieCVD_%20PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf>](http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/05_TechnologieCVD_%20PVD_PECVD_MOVPE_MBE.pdf) [cit. 18. 5. 2013].
- [16] Libra, M. *Naprašování tenkých vrstev*. Elektro: časopis pro elektrotechniku [online]. 2003, roč. 3, č. 7. Dostupné z [www:<http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484>](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25484) [cit. 18. 5. 2013]. ISSN 1210-0889.
- [17] *Povrcháři [online]*. 2008, č. 2. Dostupné z [www:<http://www.povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf>](http://www.povrchari.cz/kestazeni/200802_povrchari.pdf) [cit. 18. 5. 2013]. ISSN 1802-9833.
- [18] *Fyzikální metody nanášení tenkých vrstev [online prezentace]*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. Dostupné z [www:<http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/03_Fyzikalni_%20metody_nanaseni_tenkych_vrstev.pdf>](http://fchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/nano/predmety/senzory/03_Fyzikalni_%20metody_nanaseni_tenkych_vrstev.pdf) [cit. 25. 5. 2013].
- [19] Pfeiffer Vacuum GmbH (Asslar). *pfeiffer-vacuum.com [www stránky firmy]*. 2013. Dostupné z [www:<http://www.pfeiffer-vacuum.com/>](http://www.pfeiffer-vacuum.com/) [cit. 3. 6. 2013]. Webové stránky firmy nabízející produkty z oblasti vytváření a měření vakua.
- [20] Agilent Technologies (Santa Clara). *home.agilent.com [www stránky firmy]*. 2000-2013. Dostupné z [www:<http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=CZ&lc=eng>](http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=CZ&lc=eng) [cit. 3. 6. 2013]. Webové stránky firmy nabízející produkty z oblasti vytváření a měření vakua.
- [21] Activair (Opava). *activair.cz [www stránky firmy]*. 2013. Dostupné z [www:<http://http://www.activair.cz/>](http://http://www.activair.cz/) [cit. 4. 6. 2013]. Webové stránky firmy nabízející produkty a služby z oblasti vytváření a měření vakua.

- [22] Pačíška, T. *Deskripce podtlakových manipulačních koncových efektorů průmyslových robotů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 46 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.
- [23] Jeřábek, L. *Analyzátor vodného roztoku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
- [24] Něnička, Jakub. *Odstraňování původních povlaků řezných nástrojů před novým povlakováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. s. 78, příloh 6. Doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Příloha A

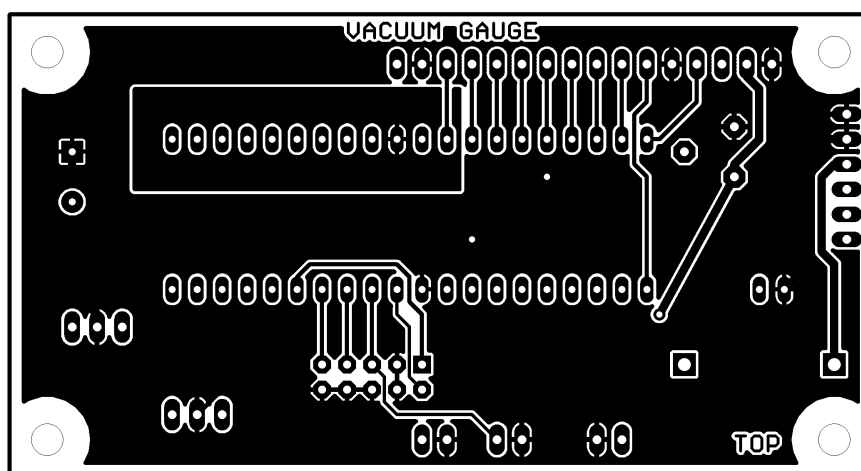
Schéma zapojení



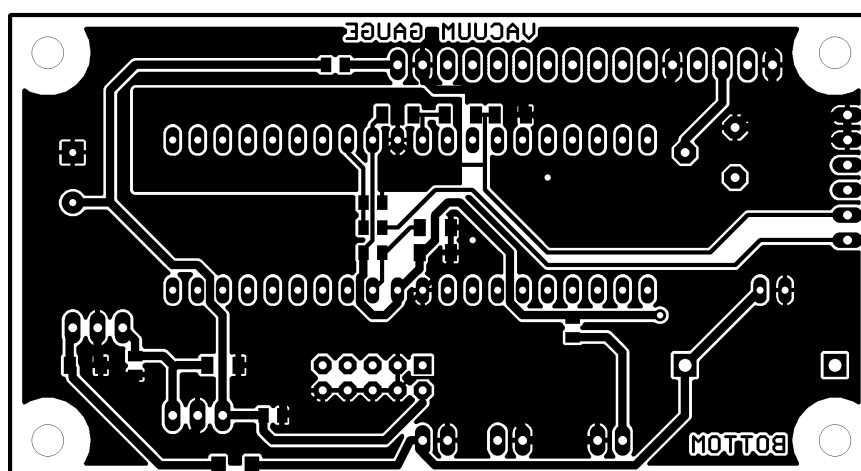
Obr. A.1: Schéma zapojení elektronické vyhodnocovací jednotky

Příloha B

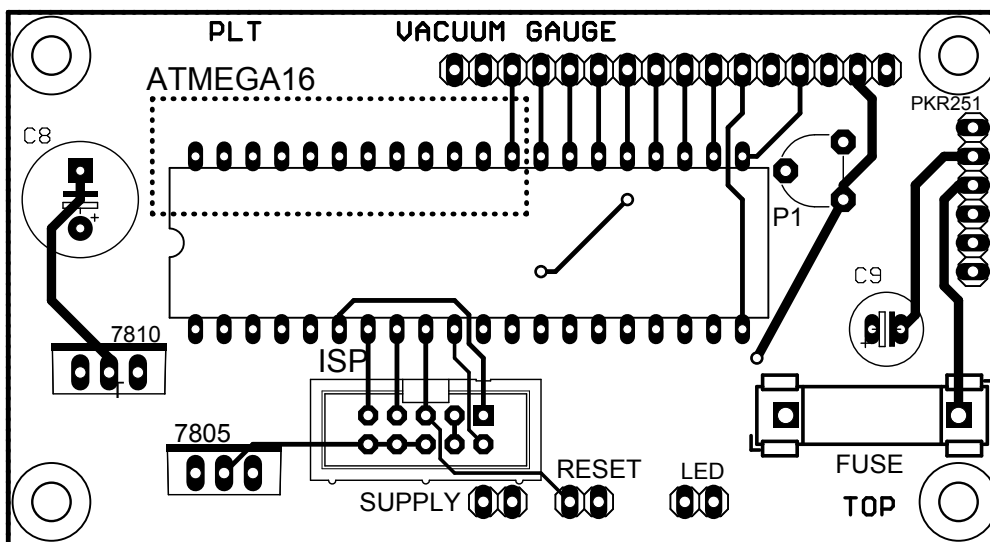
Deska plošného spoje



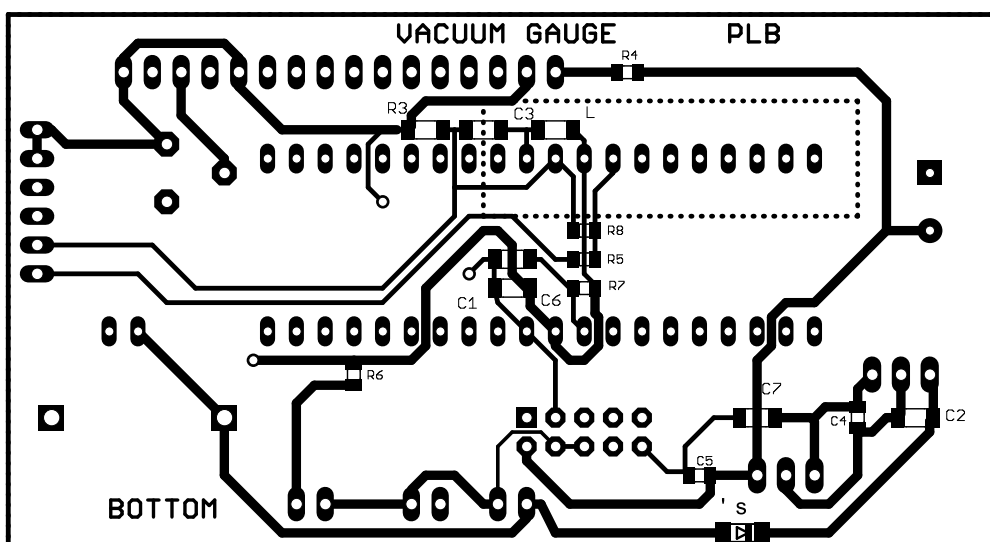
Obr. B.1: Deska plošného spoje elektronické vyhodnocovací jednotky - horní strana



Obr. B.2: Deska plošného spoje elektronické vyhodnocovací jednotky - spodní strana



Obr. B.3: Osazovací výkres - horní strana desky



Obr. B.4: Osazovací výkres - spodní strana desky

Příloha C

Fotografie realizované vyhodnocovací jednotky



Obr. C.1: Fotografie přední strany vyhodnocovací jednotky



Obr. C.2: Fotografie zadní strany vyhodnocovací jednotky

Příloha D

Partlist

Součástka	Hodnota	Popis	Pouzdro	Cena v Kč
7805		Spojité stabilizátor napětí	TO-220	8,20
7810		Spojité stabilizátor napětí	TO-220	8,80
ATmega16		Mikrokontrolér	DIP-40	159,00
C ₁	100 nF	Keramický kondenzátor	1206	1,00
C ₂	330 nF	Keramický kondenzátor	1206	1,00
C ₃	100 nF	Keramický kondenzátor	1206	1,00
C ₄	100 nF	Keramický kondenzátor	0805	1,00
C ₅	100 nF	Keramický kondenzátor	0805	1,00
C ₆	100 nF	Keramický kondenzátor	1206	1,00
C ₇	330 nF	Keramický kondenzátor	1206	1,00
C ₇	470 μ F	Elektrolytický kondenzátor	THT	2,10
C ₇	100 μ F	Elektrolytický kondenzátor	THT	2,10
D ₁	1N4007	Dioda	minimelf	1,00
Fuse		Držák na pojistku	5x20 mm	4,00
ISP konektor		Konektor	MLW10	5,50
L	1 μ H	Tlumivka	1206	5,00
LED	zelená	LED dioda	3 mm	2,20
T ₁	50 k Ω	Trimr	PT6V	5,00
R ₃	0 Ω	Rezistor	1206	2,00
R ₄	10 Ω	Rezistor	805	2,00
R ₅	10 k Ω	Rezistor	805	2,00
R ₆	220 Ω	Rezistor	805	2,00
R ₇	10 k Ω	Rezistor	805	2,00
R ₈	10 k Ω	Rezistor	805	2,00
LCD	MC1602E-SYL/H	LCD displej		160,00
LCD konektor	1x16 pinů	Konektor se zámkem		90,00
PKR 251 konektor	1x6 pinů	Konektor se zámkem		34,00
Supply konektor	1x2 piny	Konektor se zámkem		13,00
Reset konektor	1x2 piny	Konektor se zámkem		13,00
LED konektor	1x2 piny	Konektor se zámkem		13,00
Napájecí konektor	souosý 2,5 mm	Napájecí konektor do panelu		5,00
Adaptér	230/24 V	Napájecí adaptér síťový		275,00
Vypínač	WSB3100	Vypínač síťový, dvoupólový		28,10
Tlačítko	B1383	Tlačítko do panelu		48,30
Konstrukční krabička	150x110x70 mm	Konstrukční krabička	KP8	64,00

Tab. D.1: Partlist

Příloha E

Zdrojové kódy

E.1 Hlavní program

```
1 /*Tento program byl vytvořen jako součást bakalářské práce "Elektronická vyhodnocovací jednotka pro vakuovou
2 měрку." Program pracuje tak, že po inicializaci LCD displeje, zobrazení krátkého intra a konfiguraci A/D
3 převodníku, přejde mikroprocesor ATmega16 do módu ADC Noise Canceller Mode (ADC Noise Reduction Mode) a
4 spustí se převod. Po jeho skončení je vyvoláno přerušení, mikroprocesor je probuzen a naměřená desetibitová
5 hodnota je přičtena k hodnotě proměnné "sum", zároveň je inkrementována proměnná "number". Po dosažení
6 64 převodů jsou tyto proměnné poděleny, aby se získala průměrná hodnota. Výsledek je vynásoben kvantizačním
7 krokem a získaná hodnota předána uživatelské funkci "mbarAndPa", kde je proveden přepoččet naměřeného napětí
8 na tlak v mbar a Pa a výsledky jsou zobrazeny na LCD displeji.
9 Vytvořeno v prostředí Atmel Studio 6. Autor: Jaroslav Bečka.
10 */
11 #ifndef F_CPU
12 #define F_CPU 1000000UL
13 #endif
14
15 #include <avr/io.h>
16 #include <util/delay.h>
17 #include <avr/interrupt.h>
18 #include <math.h>
19 #include <stdio.h>
20 #include <stdlib.h>
21 #include <avr/sleep.h>
22 #include "lcd.h"
23
24 #define QuantizationStep 0.009775171
25 #define mbarConst 11.33
26 #define PaConst 9.33
27 #define Ten 10.0
28 #define ExponentConst 1.667
29
30 //Funkce pro přepoččet naměřeného napětí na hodnotu tlaku v mbar a Pa a následný výpis na LCD
31 void mbarAndPa(double MeasuringSignal_mbarAndPa)
32 {
33     double display_mbar;
34     double display_Pa;
35     display_mbar = pow(Ten, (ExponentConst*MeasuringSignal_mbarAndPa-mbarConst));
36     display_Pa = pow(Ten, (ExponentConst*MeasuringSignal_mbarAndPa-PaConst));
37     char buffer_mbar[10];
38     char buffer_Pa[10];
39     sprintf(buffer_mbar, "%1.2e", display_mbar);
40     sprintf(buffer_Pa, "%1.2e", display_Pa);
41     LCD_GoToXY(1,1);
42     LCD_SendAString(buffer_mbar);
43     LCD_SendAString(" ");
44     LCD_GoToXY(13,1);
45     LCD_SendAString("mbar");
46     LCD_GoToXY(1,2);
47     LCD_SendAString(buffer_Pa);
48     LCD_SendAString(" ");
49     LCD_GoToXY(13,2);
```

```

50     LCD_SendAString("Pa");
51 }
52
53 void ADC_Config(void)
54 {
55     //Konfigurace ADC
56     ADCSRA |= ((1<<ADPS1)|(1<<ADPS0)); //1 000 000:8 = 125 000
57     ADMUX &= ~(1<<ADLAR); //8-bit nebo 10-bit rozlišení, volba zarovnění bitů
58     ADMUX |= 1<<REFS0; //Volba napěťové reference
59     ADMUX |= ((1<<MUX2)|(1<<MUX1)|(1<<MUX0)); //Volba kanálu ADC7
60     ADCSRA |= 1<<ADIE; //Povolení přerušování od ADC
61     ADCSRA |= 1<<ADEN; //Zapnutí ADC
62     sei(); //Globální povolení přerušování
63     MCUCR &= ~(1<<SM2)|(1<<SM1);
64     MCUCR |= 1<<SM0; //Nastavení módu - ADC Noise Reduction Mode
65     sleep_mode(); //Přechod do režimu spánku
66 }
67
68 //Globální proměnné pro potřeby průměrování naměřených hodnot
69 uint16_t sum=0;
70 uint16_t number=0;
71
72 void main(void)
73 {
74     LCD_Init(); //Inicializace LCD
75     VacuumGauge(); //Intro
76     ADC_Config(); //Konfigurace ADC
77     double MeasuringSignal;
78     while(1)
79     {
80         if(number==64)
81         {
82             MeasuringSignal = (double)(sum/number)*QuantizationStep;
83             mbarAndPa(MeasuringSignal);
84             number = 0;
85             sum = 0;
86         }
87         sleep_mode();
88     }
89 }
90 //Rutina přerušování a zobrazení výsledků na LCD
91 ISR(ADC_vect) //ISR = Interrupt Service Routine, vektor přerušování pro A/D převodník - ADC_vect
92 {
93     uint8_t theLowADC = ADCL;
94     uint16_t theTenBitResults = ADCH<<8 | theLowADC; //Uložení 10bitů převodníku do jedné proměnné
95     sum += theTenBitResults;
96     number++;
97     _delay_ms(5);
98 }

```

E.2 Hlavička knihovny pro práci s LCD

```

1 #ifndef lcd
2 #define lcd
3
4 #include <avr/io.h>
5 #include <util/delay.h>
6
7 #define E PD6
8 #define RS PD7
9 #define LCD PORTC
10 #define LCCR PORTD
11
12 void LCD_Init(void);
13 void LCD_ClearDisp(void);
14 void LCD_SetAddress(unsigned char add);
15 void LCD_PutChar(unsigned char letter);
16 void VacuumGauge(void);
17 void LCD_SendAString(char *StringOfCharacters);
18 void LCD_GoToXY(uint8_t x, uint8_t y);

```



```
19
20 #endif
```

E.3 Knihovna pro práci s LCD

```
1 #include <avr/io.h>
2 #include <util/delay.h>
3 #include "lcd.h"
4
5 void LCD_Init(void) //inicializace lcd MC 1606E-SYL/H, řadič S6A0069
6 {
7     //_delay_ms(200); //čekání po zapnutí
8     //Nastavení pinů portů C a D jako výstupní
9     DDRC=0xFF;
10    DDRD=0xFF;
11
12    LCDR &=~(1<<RS);
13    LCDR |= (1<<E);
14    _delay_ms(1);
15    LCD = 0b00111100; //FUNCTION SET - 2-line mode, display on
16    _delay_ms(1);
17    LCDR &=~(1<<E);
18    _delay_ms(1);
19
20    LCDR &=~(1<<RS);
21    LCDR |= (1<<E);
22    LCD = 0b00001100; //DISPLAY ON/OFF CONTROL - display on, cursor off, cursor blink off
23    _delay_ms(1);
24    LCDR &=~(1<<E);
25    _delay_ms(1);
26
27    LCDR &=~(1<<RS);
28    LCDR |= (1<<E);
29    _delay_ms(1);
30    LCD = 0b00000001; //DISPLAY CLEAR
31    _delay_ms(2);
32    LCDR &=~(1<<E);
33    _delay_ms(5);
34
35    LCDR &=~(1<<RS);
36    LCDR |= (1<<E);
37    _delay_ms(1);
38    LCD = 0b00000110; //ENTRY MODE SET - increment mode, entire shift off
39    _delay_ms(1);
40    LCDR &=~(1<<E);
41    _delay_ms(1);
42
43 }
44 //Mazání LCD
45 void LCD_ClearDisp(void)
46 {
47     LCDR &=~(1<<RS);
48     LCDR |= (1<<E);
49     _delay_ms(1);
50     LCD = 0b00000001;
51     _delay_ms(1);
52     LCDR &=~(1<<E);
53     _delay_ms(1);
54
55 }
56 //Nastavení adresy v DDRAM
57 void LCD_SetAddress(unsigned char address)
58 {
59
60     LCDR &=~(1<<RS);
61     LCDR |= (1<<E);
62     _delay_ms(1);
63     LCD = address;
64     LCD |=0x80;
65     _delay_ms(1);
```

```
66     LCDR &=~(1<<E);
67     _delay_ms(1);
68 }
69
70 //Poslání znaku do DDRAM
71 void LCD_PutChar(unsigned char character)
72 {
73     LCDR |= ((1<<E)|(1<<RS));
74     _delay_ms(1);
75     LCD = character;
76     _delay_ms(1);
77     LCDR &=~(1<<E);
78     _delay_ms(1);
79
80 }
81 //Intro
82 void VacuumGauge(void)
83 {
84
85     LCD_GoToXY(3,1);
86     LCD_SendAString("Vacuum");
87     LCD_GoToXY(10,2);
88     LCD_SendAString("Gauge");
89
90     _delay_ms(2000);
91     LCD_ClearDisp();
92
93 }
94 //Poslání řetězce znaků do DDRAM
95 void LCD_SendAString(char *StringOfCharacters)
96 {
97     while(*StringOfCharacters>0)
98     {
99         LCD_PutChar(*StringOfCharacters++);
100    }
101 }
102 //Funkce jdi na pozici X,Y
103 void LCD_GoToXY(uint8_t x, uint8_t y)
104 {
105     char FirstColumnPosition[2]={0x00,0x40};
106     LCD_SetAddress(FirstColumnPosition[y-1]+(x-1));
107 }
```