

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra Fyziky
Obor: Fyzikální technika



Měření neutrálního plynu v zařízeních pro termojaderní fúzi

Measuring neutral gas in
thermonuclear fusion apparatuses

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Matej Škerlik
Vedoucí práce: Mgr. Jozef Varju, Ph.D.
Rok: 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v přiloženém seznamu.

Nemám žádný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne
.....
Matej Škerlik

Poděkování

Hlavné poděkovanie patrí môjmu vedúcemu, Mgr. Jozefovi Varju Ph.D. bez ktorého trpežlivosti, pomoci a cenných rád by táto práca nemohla vzniknúť.

Matej Škerlik

Název práce:

Měření neutrálního plynu v zařízeních pro termojaderní fúzi

Autor: Matej Škerlik

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzikální technika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Jozef Varju. Ph.D.

Ústav Fyziky Plazmatu AV ČR, v.v.i. Za Slovankou 1782/3 182 00
Praha 8, Libeň

Konzultant: –

Abstrakt: Pre mnohé priemyselné, či vedecko-výskumné aplikácie je dôležité vákuum. Jeho vytvorenie a meranie. V tejto bakalárskej práci sa zameriavam na opisanie základných pojmov spojených s vákuom, stavbu vákuovej aparátúry pre dosiahnutie vysokého vákuu a jeho následné zmeranie.

Hlavným cieľom tejto práce bolo postaviť nepriamy vákuový ionizačný manometer typu Bayard-Alpert. K poskytnutému torzu (kovové vlákna v sklenenej banke) pripojiť elektrické komponenty a následne premerať chovanie merky pri rôznych nastaveniach zdrojov napäcia pri rôznych tlakoch. Na základe toho určiť optimálne parametre a pripraviť ju na reálne použitie vo vákuových aparátúrach.

Klíčová slova: vákuum, manometer, výveva

Title:

Measuring neutral gas in thermonuclear fusion apparatuses

Author: Matej Škerlik

Abstract: For many industrial or scientific-research applications, vacuum is important. Its creation and measurement. In this bachelor thesis I focus on describing the basic concepts associated with vacuum, the construction of a vacuum apparatus for achieving high vacuum and its subsequent measurement.

Main objective of this thesis was to build an indirect Bayard-Alpert ionization manometer. To the provided torque (metallic filaments in a glass bank) connect the electrical components and then to measure the behavior of the manometer at different voltage settings at different pressures. Based on this, determine optimal parameters and prepare it for real use in vacuum appliances.

Key words: vacuum, manometer, pump

Obsah

Úvod	7
1 Teoretický úvod	9
1.1 Základné pojmy a definície	9
1.2 Generovanie vákua	12
1.3 Meranie vákua	14
1.3.1 Absolútne manometre	14
1.3.2 Nepriame manometre	16
1.4 Elektrické komponenty	20
2 Experiment	23
2.1 Účel experimentu	23
2.2 Popis aparátury	23
2.3 Stavba aparátury	25
2.4 Návrh vylepšenia experimentu	26
3 Namerané hodnoty	30
3.1 Spôsob spracovania výsledkov	30
3.2 Hodnoty v závislosti na predpätí mriežky	31
3.3 Hodnoty v závislosti na žhaviacom prúde	31
3.4 Hodnoty v závislosti na predpätí katódy	35
3.5 Kalibračné hodnoty	38
Záver	44
Literatúra	47
Přílohy	48
A Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami závislostí na predpätí mriežky a tlaku.	48
B Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami závislostí na žhaviacom prúde a tlaku.	53
C Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami závislostí na predpätí katódy a tlaku.	57
D Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami pre kalibráciu.	60

Úvod

Základ vákuovej techniky siaha až do 17. storočia. V roku 1643 Galileiho žiak Torricelli dosiahol vákuum pomocou ortute v uzavorennej trubici. Na jeho počesť bola pomenovaná jednotka tlaku $Torr = 1\text{mm stĺpca ortute}$ ($1\text{Torr} = 133,3\text{Pa}$). V 18. storočí Bernouli položil základy kinetickej teórie plynov ktorá bola dokázaná v 19. storočí a slúži ako teoretický základ vákuovej fyziky. Prelom vo vývoji vákuovej fyziky bol objav žiarovky roku 1879 ako prvého masovo vyrábaného vákuového produktu. Tým sa vákuum stalo technickým a priemyselným oborom. Na prelome 19. a 20. storočia sa uskutočnila rada objavov ktoré by neboli možné bez vákuu, ako napríklad objav RTG lúčov, elektrónovej emisie, elektrónky a ďalších. Veľkým medzníkom v obore vákuovej techniky bol objav difúznej vývevy v roku 1913 ktorou bolo možné rýchlo čerpať veľké objemy. V tom istom čase boli objavené aj iné metódy čerpania, ako napríklad molekulová výveva, či kryosorpčná výveva. Tak isto došlo k veľkému rozvoju merania tlakov nepriamymi metódami – tepelný a ionizačný vákuomer. Po druhej svetovej vojne došlo k veľmi rýchlemu rozvoju fyziky a techniky vákuua. Boli vynájdené nové metódy čerpania. Tak isto boli zdokonalené existujúce vývevy a spôsoby merania tlaku. Vzniká nový fyzikálny oboř – fyzika nízkych tlakov. Zaoberá sa štúdiom objemových a povrchových procesov v nízkych tlakoch. V súčasnej dobe dochádza stále k rozvíjaniu tohto obořu. Stal sa nedeliteľnou súčasťou špičkového výskumu a priemyselnej výroby v mnohých rôznych odvetviach.

Priemyselných využití vákuua je skutočne mnoho. Od výroby veľmi čistých materiálov až po rôzne prístroje ako žiarovka či sacie systémy. Vákuum sa využíva aj v potravinárskom priemysle, napríklad k výrobe instantnej kávy. Veľmi rozšírené je taktiež výskumné využitie vákuovej techniky v mnohých vedných oboroch. Či už vo fyzike častíc, kde je potrebné zaistiť aby skúmané nalietavajúce čästice v urýchľovačoch neinteragovali s molekulami vzduchu a tak isto aj v tokamakoch. Experimentálnych zariadeniach pre termojadrovú fúziu.

Z dôvodu takto rozšíreného použitia v mnohých oblastiach je potrebné štúdium a porozumenie fyzike a technike vákuua. Hlavný účel tejto bakalárskej práce je preto oboznámiť sa s vákuom teoreticky ako aj prakticky. V prvej časti bakalárskej práce je preto uvedený teoretický úvod. Ten obsahuje základné fyzikálne pojmy spojené s vákuom ako aj technické vybavenie potrebné ku generácii a meraniu vákuua. Sú preto opísané spôsoby a vybavenie potrebné ku generácii vákuua a tak isto spôsoby merania nízkych tlakov – absolútne i nepriame.

V ďalšej časti sa zameriavam na svoj experiment. Jeho popis, stavbu a možné vylepšenia. Účelom bolo z dostupného vybavenia postaviť vákuovú komoru, dosiahnuť

v nej vysoké vákuum a použiť ju na zmeranie ionizačnej merky typu Bayard-Alpert a premerať vlastnosti tejto merky. Pri nej som mal k dispozícii len sklenenú banku v ktorej sa nachádzali potrebné kovové vlákna. Za pomoc poskytnutých laboratórnych zdrojov a elektrometrov som navrhol a zostavil elektronickú časť ktorá sa starala o prevádzku prístroja a meranie potrebných hodnôt. Na automatizáciu som použil bežne dostupné mikrokontrolery.

V poslednej časti tejto práce opisujem výsledky svojich meraní, prevádzkové parametre postavenej merky, jej vlastnosti a chovanie pri rôznych stupňoch vákuu a pri rôznych hodnotách elektrických parametrov. Nasleduje diskusia a záver nameňaných výsledkov.

V mnohých rôznych výskumných ústavoch sa stále nachádza množstvo takýchto meriek ku ktorým už elektronika (kontrolery) vôbec neexistuje, alebo je neopraviteľná. Táto práca môže byť prvým krokom k ich opäťovnému využitiu.

Kapitola 1

Teoretický úvod

1.1 Základné pojmy a definície

Vákuum je definované ako priestor v ktorom je tlak menší ako tlak atmosférický. Atmosférický tlak je rádovo 10^5 Pascalov. V závislosti na veľkosti tlaku sa posudzuje kvalita vákuua. Rozdelenie druhov vákuua (nízke, stredné, vysoké atď.) podľa tlaku sa v rôznych zdrojoch lísi. Rozdelenie podľa [1] je uvedené v Tab. (1.1).

Vo vzťahu k vákuuu sa udáva niekoľko rôznych pojmov. V nasledujúcich riadkoch budú objasnené niektoré z nich.

Tlak: Tlak je definovaný ako sila pôsobiaca na jednotku plochy. V medzinárodnej sústave jednotiek SI je tlak vyjadrený ako newton na meter štvorcový [N/m^2]. Táto jednotka sa nazýva pascal [Pa].

Parciálny tlak: Jedná sa o tlak určitého plynu (par) ktorý by bol využívaný týmto plnom v prípade že by bol samostatne zastúpený v objeme.

Medzný tlak: Najmenší tlak ktorý je možný dosiahnuť vo vákuovej aparátúre. Závisí primárne na použitej výveve, ale tak isto aj aparátúre samotnej. Na jej čistote, tesnení, veľkosti, geometrii a samozrejme na čerpanom plne.

Koncentrácia častíc: Podľa kinetickej teórie plynu je počet molekúl plynu $n[\text{cm}^{-3}]$ vzhľadom na objem, závislý na tlaku p a teplote T podľa vzťahu:

$$n = \frac{p}{kT}, \quad (1.1)$$

	Tlakový rozsah [Pa]
Hrubé vákuum	$10^5 - 10^2$
Stredné vákuum	$10^2 - 10^{-2}$
Vysoké vákuum	$10^{-2} - 10^{-5}$
Ultra vysoké vákuum	$< 10^{-5}$

Tabuľka 1.1: Rozdelenie vákuua podľa [1].

kde k je Bolzmannova konštanta ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). Pri určitej teplote teda závisí tlak využívaný plynom iba na koncentráciu častíc a nie na povahu plynu.

Hustota plynu: Hustota plynu $\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$ je definovaná ako súčin koncentrácie častíc $n [\text{m}^{-3}]$ a hmotnosti častice $m_T [\text{kg}]$

$$\rho = n \cdot m_T. \quad (1.2)$$

Objem: Za objem $V [\text{l}, \text{m}^3, \text{cm}^3]$ môže byť považovaný bud' objem daný geometricky vákuovou aparátúrou vrátane trubiek a spojovacích častí. Alebo objem plynu závisí na tlaku, ktorý napríklad môže byť presúvaný vákuovou pumpou.

Rýchlosť čerpania: Rýchlosť čerpania $S [\text{l}/\text{s}, \text{m}^3/\text{h}, \text{cm}^3/\text{s}]$ vyjadruje objemový tok cez otvor vývey. Je vyjadrený vzťahom:

$$S = \frac{dV}{dt}. \quad (1.3)$$

Vyjadruje objem plynu V ktorý odčerpá výveva za jednotku času.

Hmotnostný tok: Hmotnostný tok $Q [\text{Pa} \cdot \text{l}/\text{s}]$ je súčin tlaku a objemu plynu ktorý pretečie nejakým elementom za čas t . Je vyjadrený rovnicou:

$$Q = \frac{pV}{t} = \frac{d(pV)}{dt}. \quad (1.4)$$

Desorpcia: Jedná sa o jav pri ktorom sa zo stien vákuovej aparátúry uvoľňuje plyn. Tým pádom sa dostáva do vnútra aparátúry a spôsobuje zvýšenie tlaku. Je to jeden z hlavných problémov pri dosahovaní veľmi nízkych tlakov. Aby sa tento proces eliminoval, musí byť zaistená čistota aparátúry.

Vypekanie aparátúry: Pri takzvanom vypekaní sa zámerne ohrieva povrch aparátúry aby došlo k desorpcii. Zohriaty plyn sa uvoľní z povrchu a je odčerpaný vývevou. Tým sa značne znížuje množstvo plynu zachyteného na stenách. Týmto spôsobom je teda možné znížiť množstvo plynu v aparátúre a dosiahanie tak výrazne nižšie tlaky. Jedná sa o veľmi rozšírenú metódu pri získavaní nízkych tlakov.

Medzný tlak: Bežne sa udáva pri vývevách, ako najnižší možný dosiahnutelný tlak s danou vývevou v aparátúre. Závisí na viacerých parametroch, ako napríklad druh použitej vývey, čistota aparátúry a podobne. Môžeme ho definovať ako podiel hmotnostného toku a rýchlosť čerpania:

$$P = \frac{Q}{S}. \quad (1.5)$$

V tomto stave dochádza k rovnováhe medzi plynom ktorý sa do aparátúry dostáva (desorpcia, netesnosť) a plynom ktorý je odčerpaný.

Prúdenie plynu: Všeobecne platí, že pri rozdieloch tlaku (napríklad pri trubici ktorá má na oboch koncoch rozdielny tlak) dochádza k toku plynu q [mbar · l · s⁻¹]. Ten sa dá vyjadriť vzťahom:

$$q = C(p_1 - p_2), \quad (1.6)$$

kde p_1 a p_2 sú rozdielne tlaky na oboch stranách trubice, a C je vodivosť danej trubice. Táto vodivosť je závislá nie len na geometrii, ale aj na tlaku v aparátúre. Vo vysokom a ultra vysokom vákuu je konštantou C nezávislá na tlaku. V hrubom a strednom vákuu je však na tlaku závislá.

Stredná voľná dráha molekúl: Následkom tepelného pohybu sa molekuly neustále chaoticky pohybujú a zrážajú sa. Priemerná vzdialenosť medzi jednotlivými zrážkami týchto molekúl sa nazýva stredná voľná dráha λ [cm]. Môžeme ju vyjadriť vzťahom:

$$\lambda = \frac{1}{\pi \sqrt{2} n d^2}, \quad (1.7)$$

kde n [cm⁻³] je koncentrácia častíc a d [cm] je priemer molekuly. Z rovnice (1.1) je vidieť, že λ je inverzne závislá na tlaku. Pre konštantnú teplotu platí vzťah:

$$\lambda p = \text{const.} \quad (1.8)$$

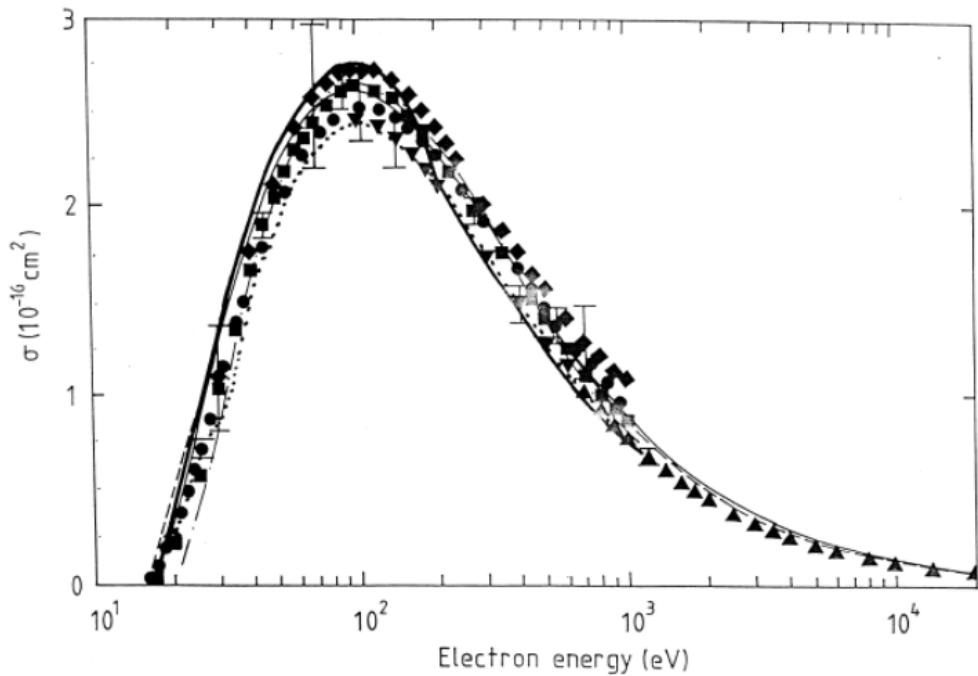
Druhy prúdenia: Prúdenie plynu v trubici prebieha rôzne v závislosti na tom či pri ňom prevládajú zrážky medzi molekulami samotnými alebo medzi molekulami a stenami trubice. V prípade hrubého vákuu prevláda takzvané viskózne prúdenie. Stredná voľná dráha molekúl je omnoho menšia než vzdialenosť medzi stenami aparátúry d a plyn sa chová ako kontinuum. Platí že $\lambda < \frac{d}{100}$ [1].

V oblasti stredného vákuua sa jedná o takzvané Knudseho prúdenie (Knudsen flow). V tomto stave sa výrazne znižuje tepelná vodivosť plynu. Platí $\frac{d}{100} < \lambda < \frac{d}{2}$ [1].

V oblasti vysokého a ultra vysokého vákuua hovoríme o takzvanom molekulárnom prúdení. V tomto stave sa výrazne znižuje počet kolízii medzi molekulami. Platí $\lambda > \frac{d}{2}$ [1].

Termoemisia: Termoemisia elektrónov je jav pri ktorom elektróny vylietavajú z povrchu kovov v dôsledku vysokej teploty kovu. Na to aby mohol elektrón vyletieť, musí mať kinetickú energiu väčšiu ako je pracovná funkcia daného kovu. Toto je možné dosiahnuť zahriatím kovu, čím elektróny získajú dostatočnú energiu. V prípade ktorým sa zaoberá táto bakalárska práca, ide o zahriatie kovového vlákna ktorým preteká veľký prúd. V prípade že je prúd dostatočne veľký, sa vlákno zahreje na dostatočnú teplotu a začnú z neho emitovať elektróny.

Ionizácia: V prípade že máme elektrón s dostatočnou kinetickou energiou ktorý sa priblíži k molekule, môže dôjsť k excitácii elektrónu v tejto molekule a jeho



Obr. 1.1: Účinný prierez ionizácie dusíka N_2 v závislosti na kinetickej energii nalielavajúcich elektrónov [13].

uvolneniu z obalu. Tým vznikne ďalší elektrón a kladne nabitý iont. Tomuto hovoríme elektrónová ionizácia. Pravdepodobnosť ionizácie vzrastá s kinetickou energiou elektrónov avšak len do určitého bodu, potom začne opäť klesať. Ako je vidieť z obrázku (1.1), účinný prierez ionizácie dusíku je najväčší vtedy, keď majú nalielavajúce elektróny energiu zhruba 100 eV. Ten istý princíp platí aj pre iné molekuly.

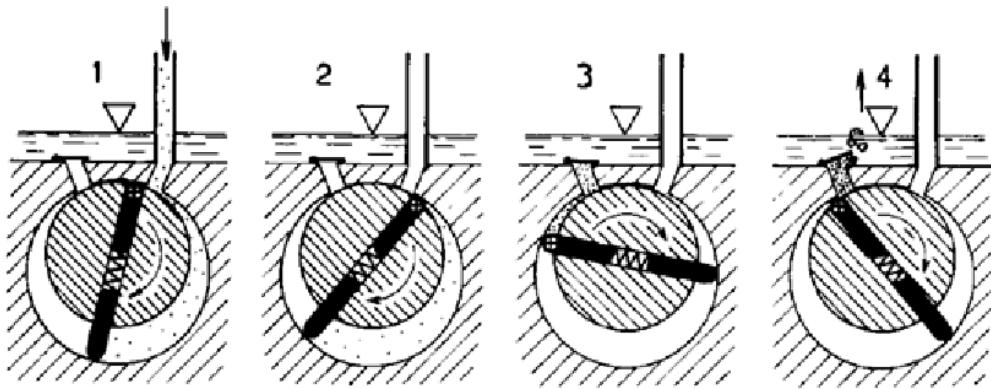
Účinný prierez: Používa sa na charakterizovanie pravdepodobnosti reakcie. Môžeme ho kvantifikovať ako charakteristickú oblasť, kde väčšia oblasť znamená väčšiu pravdepodobnosť interakcie. Jednotkou je [m^2/cm^2].

1.2 Generovanie vákua

Na generovanie vákua sa používajú vákuové pumpy - vývevy. Existuje veľa rôznych druhov v závislosti na princípe čerpania plynu. V nasledujúcej časti budú popísané tie najbežnejšie používané technickej praxi.

Rotačná olejová výveva (ROV): Jedná sa o základný a často využívaný druh vývevy, takzvanú mechanickú vytlačovaciu vývevu. Princíp je zrejmý z Obr(1.2).

Veľkou výhodou tejto vývevy je schopnosť čerpať vzduch (prípadne iný plyn) už od atmosférického tlaku (mnohé ďalšie typy toho nie sú schopné). Bežne sa za seba zapojuje niekoľko stupňov tohto procesu aby sa zefektívnil proces čerpania. Medzny tlak sa pri takomto zapojení môže pohybovať až v ráde 0,1 Pa. Nevýhodou tejto vývevy je používaný olej. Tento sa môže nedopatrením alebo poruchou dostať do



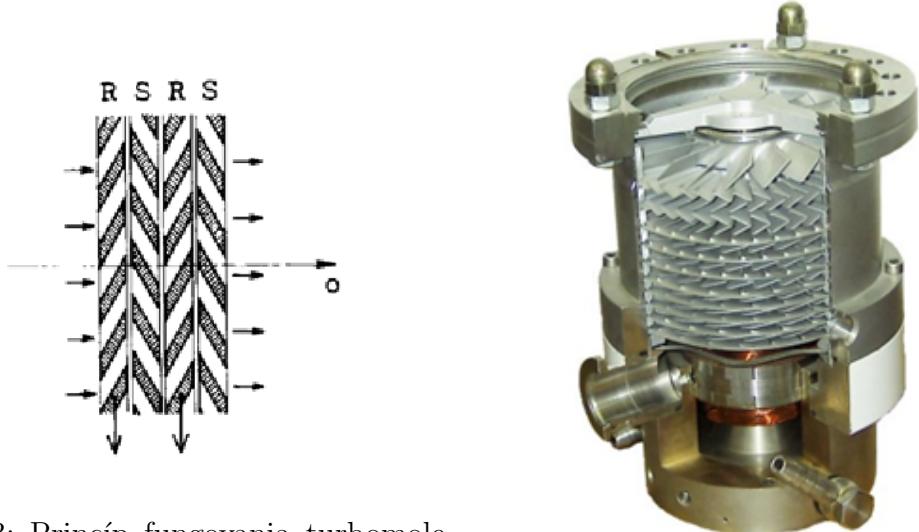
Obr. 1.2: Princíp funkcie ROV: 1-nasávanie plynu; 2-transport k výstupu; 3-kompresia; 4-výtlak plynu. [2]

vnútra aparátu a znečistiť ju. Tak isto sú problém olejové výpary ktoré sa do vnútra dostávajú. Kvôli tomu sa používajú takzvané lapače olejových pár, ktoré sa zapoja medzi ROV a čerpaný priestor.

Turbomolekulárna výveva (TMV): Veľmi rozšírenou vývevou je takzvaná turbomolekulárna výveva (TMV). Jedná sa o mechanickú vývevu. Lopatky rotoru sa točia vysokou rýchlosťou a pri kontakte s molekulou jej udelia rýchlosť v požadovanom smere. Vo výveve sa striedajú lopatky rotoru a statoru tak ako je znázornené na Obr.(1.3). Názorný obrázok sa nachádza na Obr.(1.4).

Aby tento princíp fungoval, musia byť splnené niektoré podmienky. Rýchlosť otáčania lopatiek musí byť rádovo rovnaká ako je rýchlosť pohybu molekúl. Toto je ľahšie splniteľné pre hlavné zložky vzduchu ako pre ľahké plyny. Pri $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je rýchlosť dusíku $v(N_2) = 471\text{ m/s}$ a vodíku $v(H_2) = 1755\text{ m/s}$. Z toho dôvodu majú TMV otáčky rotoru rádovo desiatky tisíc za minútu v závislosti od priemeru rotoru. Nevýhoda TMV sú pomerne vysoké parciálne tlaky ľahkých plynov (vodík, hélium...). Tak isto, TMV nie je schopná čerpať od atmosférického tlaku. Aby mohla fungovať, musí byť tlak dostatočne nízky nato aby malo prúdenie plynu molekulárny charakter. Ked'že molekuly sa v tomto stave chovajú ako jednotlivé čästice a nie ako kontinuum, je čerpacia rýchlosť a dosahovaný tlak daný hľavne plochou na ktorú môžu molekuly dopadnúť (čím väčší priemer lopatiek, tým väčšia plocha a tým väčšia pravdepodobnosť, že na ňu molekula dopadne a bude odčerpaná). Medzný tlak TMV sa môže pohybovať až v 10^{-9}Pa [1].

Z dôvodu zníženia tlaku na takú úroveň aby mohla TMV čerpať, je potrebné použiť predčerpanie vývevou schopnou čerpať už od atmosféry. Častá býva preto kombinácia ROV a TMV. Bežne sú konštruované v spojení ako čerpacie stanice.



Obr. 1.3: Princíp fungovania turbomolekulárnej vývevy. R - rotor, S - stator, o - smer osy otáčania rotoru. [2]

Obr. 1.4: Prierez turbomolekulárnu vývevou. [11]

1.3 Meranie vákuu

1.3.1 Absolútne manometre

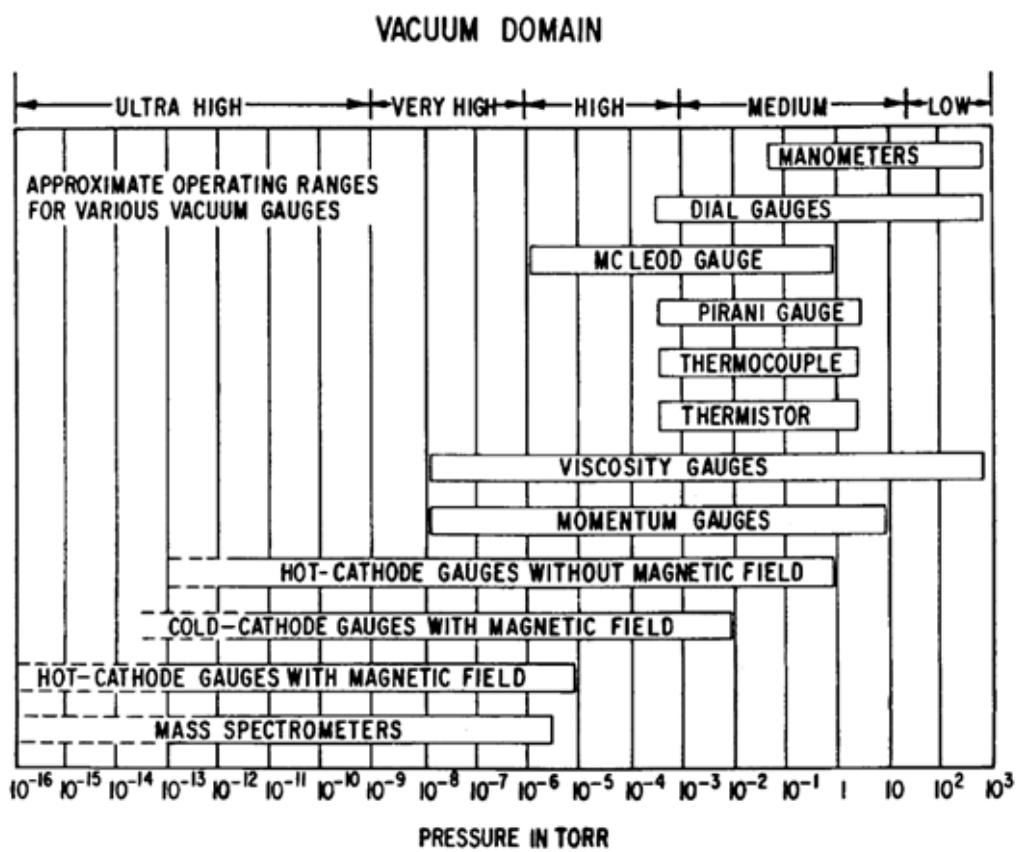
Merať tlak môžeme ako absolútne, tak aj nepriamo. Absolútne manometre sa používajú z viacerých dôvodov. Ich hlavná výhoda je že merajú tlak podľa definície a ich výstup nezávisí na druhu plynu tak ako u nepriamych meriek ktoré využívajú iné princípy. Z toho dôvodu sa taktiež používajú aj ako kalibračné. V praxi sa však bežne používajú nepriame spôsoby merania. Na Obr.(1.5) sú znázornené približné merateľné rozsahy tlakov pre rôzne typy meriek. V nasledujúcej časti budú popísané niektoré z nich. Informácie o ďalších typoch môže čitateľ nájsť napríklad v [1], [3] alebo [4].

Jedným z absolútnych manometrov je McLeodov kompresný manometer. Umožňuje merať tlaky až do rádu 10^{-3} Pa. Znázornenie je na Obr.(1.6). Po pripojení manometru do priestoru so zníženým tlakom p , hladina kvapaliny (často používaná býva ortuť – nezmáča steny manometru) zaplní objem V a vystúpi do určitej výšky v kapilárach A a B. Tlak môžeme vyrátať podľa vzorca:

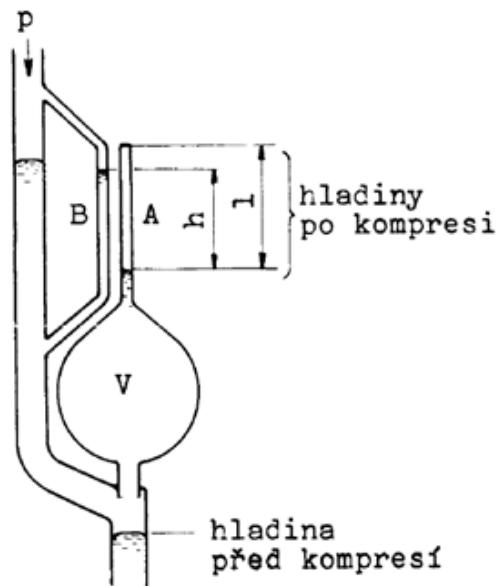
$$p = \frac{Slgh\rho}{V + V^* - Sl}, \quad (1.9)$$

kde S je prierez kapiláry A, l a h sú hladiny po kompresii (zjavné z obrázku), g je gravitačné zrýchlenie, ρ je hustota kvapaliny (zväčša ortuť), V je objem nádoby (zjavné z obrázku), V^* je objem kapiláry A. Podrobnejšie odvodenie a popis sa nachádza v [2].

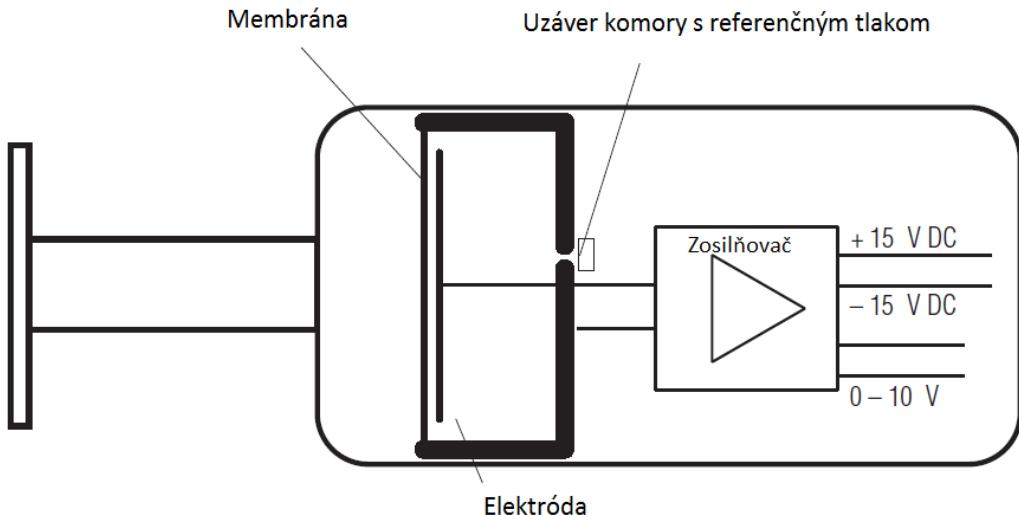
Ďalší spôsob absolútneho merania tlaku je pomocou takzvanej kapacitnej membránovej merky. Znázornenie sa nachádza na Obr.(1.7). Kovová (alebo keramická) membrána rozdeľuje priestor na dve časti. V jednej časti je dobre definovaný tlak, druhá je



Obr. 1.5: Graf znázorňujúci približné merateľné rozsahy pre rôzne typy vákuových meriek. 1 torr = 133 Pa. [4]



Obr. 1.6: Schéma McLeodovho kompresného manometra. [2]



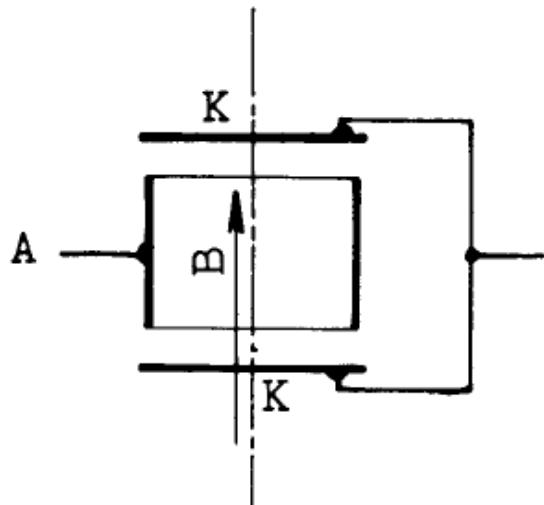
Obr. 1.7: Znázormenie vnútra kapacitnej membránovej merky. [1]

spojená s meraným objemom. Pôsobením vonkajšieho tlaku sa membrána prehýba. Táto membrána slúži ako časť doskového kondenzátoru, jej prehnutím sa teda zmení kapacita ktorú dokážeme presne zmerať. Zo zmeny kapacity a známeho referenčného tlaku sme tak schopní zistiť tlak meraný. Jedná sa o veľmi presnú metódu merania tlaku a to od atmosférického tlaku až po 10^{-1} Pa, avšak tlakový rozsah jednej merky býva bežne 3 rády. Z toho dôvodu je potrebné vybrať merku s vhodným rozsahom, podľa toho aké očakávané tlaky budeme merať. Veľká výhoda tejto merky je jej presnosť a fakt že nezávisí na druhu plynu.

1.3.2 Nepriame manometre

V praxi sa bežne používajú nepriame spôsoby merania tlaku. Jedným zo spôsobov je meranie tlaku v závislosti na tepelnej vodivosti plynu. Čím nižší tlak, tým nižšia vodivosť. Vedenie tepla plynom medzi dvoma povrchmi o rôznej teplote nezávisí na tlaku plynu ak je vzdialenosť stien veľká v porovnaní so strednou voľnou dráhou molekúl. Na druhú stranu je priamo úmerná tlaku plynu ak je vzdialenosť stien malá v porovnaní so strednou voľnou dráhou molekúl. Z toho dôvodu je možné použiť tento spôsob len v určitom tlakovom rozsahu. Pri nízkych tlakoch sa využívajú iné metódy, ktoré zase nie sú použiteľné pri tlakoch vyšších. Mnohé komerčne vyrábané merky majú preto v sebe zabudované dva druhy meradla, aby bol merací rozsah čo najväčší. Hlavnou nevýhodou nepriamych meriek je, že ich výstup závisí na plne ktorý merajú.

Jedným z typov je takzvaný odporový Piraniho manometer. Element (drôtik) je zahrievaní prechodom el. prúdu. Na meranie tlaku sa využíva závislosť odporu elementu na teplote. Čím väčší tlak, tým sa element viac ochladzuje čo sa prejaví na zmeni odporu. Tepelné manometri sú vhodné na meranie tlaku v rozsahu 10^{-1} až 10^3 Pa. V skutočnosti sú komerčne vyrábané merky fungujúce na tomto princípe



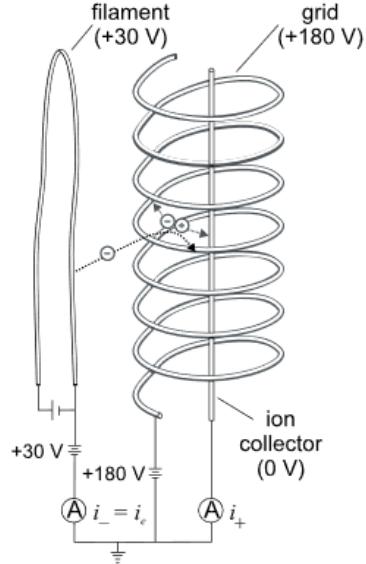
Obr. 1.8: Schéma usporiadania Penningovho manometra. A-anóda, K-katódy, B-smer magnetického poľa. [2]

schopné merať tlak už od atmosféry, to je však možné vďaka sofistikovanej elektrotechnike. Podrobnejšie informácie sa dajú nájsť napríklad v [4].

Na meranie nízkych tlakov v oblasti vysokého vákuu sa používajú takzvané ionizačné merky. Princíp spočíva v ionizácii plynu v dôsledku čoho je schopný viesť prúd. Veľkosť tohto prúdu je úmerný tlaku. Merky využívajúce tento princíp môžeme rozdeliť na merky so studenou katódou a horúcou katódou.

Bežný typ manometra so studenou katódou je takzvaný Penningov manometer. Schéma sa nachádza na Obr.(1.8). Medzi dvoma rovnobežnými katódami sa nachádza anóda v tvare prstenca alebo valcového plášťa. Napätie medzi anódou a katódami je rádovo 1kV. Elektróny ktoré medzi nimi vzniknú sú príťahované k anóde. Ich dráha je však zakrivená magnetickým poľom (stotiny až desatiny tesla) a elektróny sa pohybujú po špirále. Tým sa výrazne predĺži dráha ich letu a vzrástá pravdepodobnosť ich stretu s molekulami plynu a ich následnej ionizácie. Merky pracujúce na tomto princípe sú schopné merať tlaky aj v oblasti vysokého vákuua.

Bayard-Alperdova merka bola po prvýkrát predstavená v 50.-tych rokoch a od tej doby sa jej koncept zmenil len minimálne. Jedná sa o takzvanú ionizačnú merku s horúcou katódou. Princípom je ionizácia plynu vo vákuovej aparátúre, ktorý sa tak stane vodičom elektrického prúdu. Čím väčší prúd nameriame, tým je v aparátúre viac plynu a teda aj vyšší tlak. Žhaviaca katóda na ktorú je pripojené napätie sa prechodom prúdu zohrieva a emituje elektróny. Katóda je pripojené ešte na jeden zdroj, ktorý spôsobuje jej predpäťie. Typicky na + 30V. Predpätie katódy slúži nato aby zaistilo že sa žiadne elektróny emitované zo žhaveného vlákna nedostanú na iontový kolektor. Emitované elektróny sú urýchlené k mriežke (môže byť v tvare špirály) ktorá má napätie typicky +180V. Napätie medzi žhaveným vláknom a mriežkou určuje energiu emitovaných elektrónov. V prípade predpäťia vlákna +30V a predpäťia mriežky +180 je energia elektrónov daná rozdielom týchto predpäťí tj. 150eV (eV je energia ktorú má jeden elektrón urýchlený napäťom 1V). Typické



Obr. 1.9: Schéma usporiadania Bayard-Alperdovej merky spolu s vyznačenými zdrojmi napäcia a ich bežnými hodnotami. [8]

hodnoty týchto predpätí sa v rôznych zdrojoch mierne líšia.

Elektróny vo vnútri mriežky ionizujú molekuly plynu. V prípade, že elektrón vyletí von z mriežky, je elektrostatickým poľom okamžite pritiahnutý naspäť. Tým sa jeho dráha značne predlžuje a tým aj pravdepodobnosť interakcie s molekulami plynu a ich ionizácie. Nakoniec elektrón skončí na povrchu mriežky. Týmto vzniká elektrónový prúd (typicky 0,1 – 10 mA). Ionty vzniknuté vo vnútri mriežky sú zozbierané vláknom ktoré sa nachádza v ose mriežky a je uzemnené (jeho potenciál je 0V). Tým vzniká iontový prúd. O napájanie sa starajú 3 zdroje napäcia. Prvý zdroj je plávajúci tj. nie je uzemnený. Slúži ako zdroj napäcia a prúdu pre žhaviacu katódu. Druhý zdroj je napojený na ten prvý a slúži na posunutie napäcia na katóde na kladnú hodnotu. Tretí zdroj slúži na príťahovanie elektrónov ktoré emituje katóda. Princíp a zapojenie je znázornené na Obr.(1.9).

Počet vzniknutých iónov závisí na niekoľkých parametroch. Sú to: počet molekúl plynu v jednotke objemu, pravdepodobnosť ionizácie pre konkrétny plyn pre elektróny s danou energiou, emisný elektrónový prúd a dĺžka dráhy elektrónov. Po uvážení všetkých týchto faktorov dostaneme finálnu rovnicu pre tlak:

$$p = \frac{I_i}{c I_e}, \quad (1.10)$$

kde I_e je elektrónový prúd, I_o je iontový prúd a c je konštanta merky (uvádzaná aj ako citlivosť merky S). Táto konštanta v sebe zahŕňa vnútorné parametre merky ako napríklad geometrické usporiadanie, materiál a podobne. Podrobnejšie odvodenie tohto vzorca sa nachádza v [7]. Meraný tlak je však závislý aj na plyne. Bežne bývajú tieto merky kalibrované na dusík, pri iných plynoch je potrebné túto hodnotu prenásobiť faktorom korekcie plynu pre daný plyn. V Tab.(1.2) sa nachádzajú

Typ plynu	Faktor korekcie plynu
He	6,9
Ne	4,35
Ar	0,83
Kr	0,59
Xe	0,33
Hg	0,303
H ₂	2,4
CO	0,92
CO ₂	0,69
CH ₄	0,8

Tabuľka 1.2: Tabuľka faktorov korekcie plynu pre rôzne plyny vzhľadom na dusík (pre dusík = 1). [1]

uvedené hodnoty týchto faktorov.

Je potrebné si uvedomiť, že konštantu merky c sa dá určiť len kalibráciou, vzhľadom na to že závisí na toľkých parametroch. Tak isto je potrebné vziať do úvahy teplotu ktorá musí byť konštantná (teoreticky). Pri izbovej teplotu sú však zmeny teploty zanedbateľné. Podľa [7] je zmena iontového prúdu okolo 0,075%/K. Je však potebné pred samotným meraním chvíľu počkať než nastane tepelná rovnováha v dôsledku vysokej teploty žhaviacej katódy. Vysoká teplota žhaveného vlákna má mnoho nevýhod, jednou z nich je jeho spálenie pri vyšších tlakoch (ďalšie sú spomenuté v nasledujúcej časti).

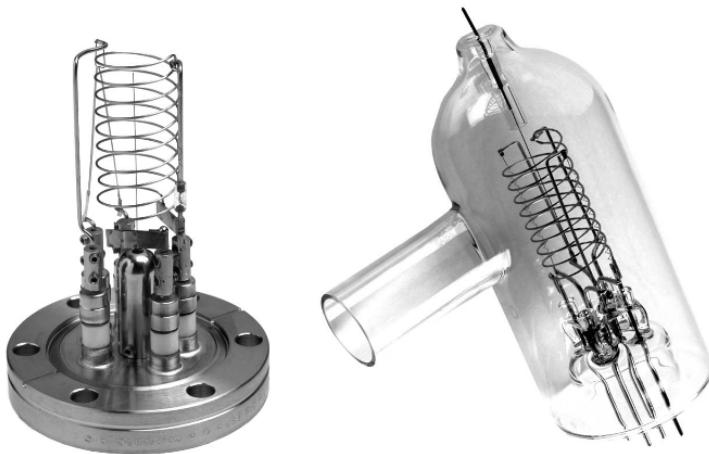
Limitné faktory pre meranie veľmi nízkych tlakov pomocou B-A merky.

Z rovnice (1.10) by sa mohlo zdať, že limitom merania je len samotný elektrometer. Avšak z pokusov [7] vyplýva, že platí skôr táto všeobecná rovnica:

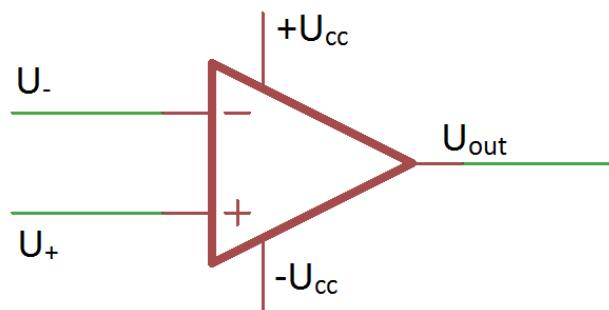
$$I_i = cI_{ep} + I_r \quad (1.11)$$

kde I_r je zvyškový prúd (residual current). Tento prúd je nezávislý na tlaku. Hlavnými prispievateľmi sú elektróny ktoré vznikli foto-emisiou z röntgenového žiarenia. Toto žiarenie vzniká, keď emitované elektróny dopadnú na mriežku. Prispievateľom sú tak isto samotné elektrometre a ďalšia elektronika. Tento fakt môže spôsobiť, že budú namerané relatívne veľké hodnoty prúdu v nízkych tlakoch.

Tak isto je dôležité si uvedomiť, že merka samotná môže mať vplyv na čerpanie. Môže slúžiť ako zdroj plynu kvôli uvoľňovaniu plynu v dôsledku vysokej teploty a tak isto aj ako pumpa samotná (podrobnejšie informácie v [7]). Tieto faktory budú hrať oveľa väčšiu úlohu v relatívne malom vákuovom systéme, než vo veľkom priemyselnom. Tak isto je treba vziať do úvahy rozdiely v tlaku v merke samotnej (v jej obale ktorý je pripojený do aparátu) a hlavným priestorom samotnej aparátu. Z toho dôvodu môže byť lepšie využívanie takzvaných holých meriek ktoré sú umiestňované priamo do aparátu. Tak isto natekanie prevažne ľahkých plynov cez obal (miesto odkiaľ vedú vodiče von z aparátu). Znázornenie holej B-A merky



Obr. 1.10: Na ľavej strane holá B-A merka, na pravej v sklenenom obale. [7]



Obr. 1.11: Schematická značka OZ. U_{cc} - napájanie. U_- - invertujúci vstup, U_+ - neinvertujúci vstup, U_{out} - výstup.

a merky v sklenenom obale sa nachádza na Obr.(1.10).

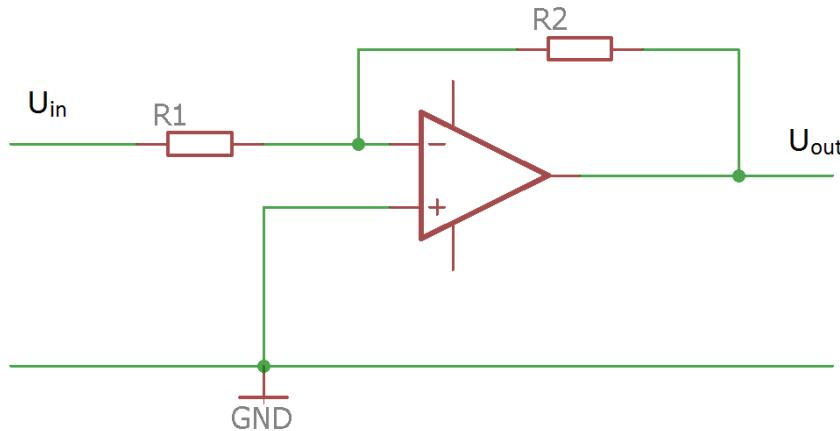
1.4 Elektrické komponenty

Jedným z dôležitých komponentov použitých v tejto bakalárskej práci je takzvaný operačný zosilňovač. OZ je súčiastka ktorá zosilňuje rozdiel napäťia medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom. V minulosti boli elektrónkové, neskôr tranzistorové. V súčasnej dobe sú vo forme integrovaných obvodov. Ich výhoda je malá veľkosť (rádovo cm^2) a veľmi nízka cena (desiatky euro centov). Schematická značka sa nachádza na Obr.(1.11). Napájanie U_{cc} je typicky symetrické okolo $\pm 12V$ alebo $\pm 15V$, samozrejme záleží na konkrétnom type. Technické parametre ideálnych OZ sa líšia od tých skutočných. V Tab.(1.3) sa nachádzajú základné parametre OZ a porovnanie medzi idealizovaným prípadom a skutočnosťou.

Možnosti zapojenia OZ sú rôzne. V nasledujúcich riadkoch budú uvedené zapojenia

		Ideálny	Reálny
Zosilnenie bez spätej väzby	A_0	∞	$10^3 - 10^6$
Vstupný odpor	R_{in}	$\infty \Omega$	$10^5 - 10^{15} \Omega$
Výstupný odpor	R_{out}	0Ω	$30 \Omega - 1k \Omega$
Rozdielové napätie medzi oboma vstupmi	U_D	0 V	0,1 - 0,2 mV

Tabuľka 1.3: Technické parametre OZ a ich porovnanie medzi ideálnym a reálnym zosilňovačom.



Obr. 1.12: Invertujúce zapojenie operačného zosilňovača.

využité v tejto bakalárskej práci.

Invertujúci zosilňovač: Pri tomto zapojení (schéma na Obr.(1.12)) platí pre výstupné napätie rovnica:

$$U_{out} = -\frac{R_2}{R_1}U_{in}. \quad (1.12)$$

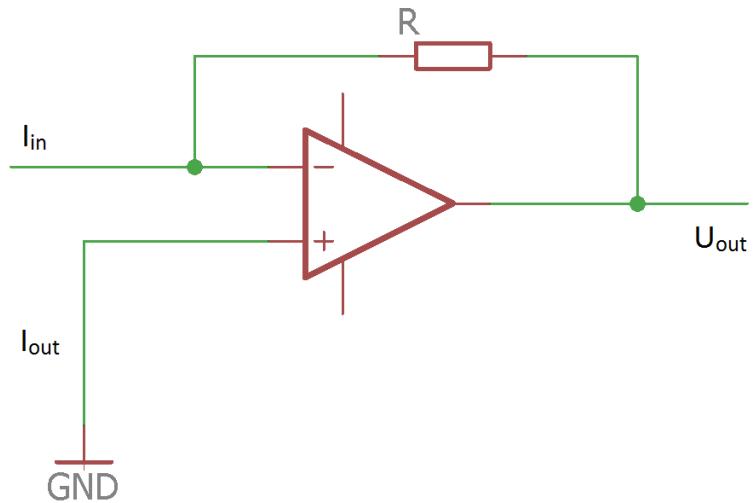
Z toho jasne vyplýva, že ak sú odpory R_1 a R_2 rovnaké, veľkosť napäťia sa nezmení, zmení sa len jeho polarita. Vstupné a výstupné napätie sa merá medzi vstupom alebo výstupom a zemou.

Transimpedančný zosilňovač: Zapojenie je podobné ako pri invertujúcim OZ (schéma na Obr.(1.13)). Toto zapojenie slúži na prevod prúdu na napätie. Platí Ohmov zákon:

$$U_{out} = I_{in}R. \quad (1.13)$$

Zapojením dostatočne veľkého odporu R sme týmto spôsobom schopný merať aj malé prúdy, pomocou napäťia medzi výstupom a zemou.

Arduino: Arduino je jednočipový mikrokontrolér ktorý je používaný k vytváraniu samostatných interaktívnych zapojení. Jedná sa o takzvanú open-source platformu. Je dostupných niekoľko druhov Arduina a mnoho komponentov ktoré k sa k nemu



Obr. 1.13: Transimpedančné zapojenie operačného zosilňovača.

dajú pripojiť. V tejto bakalárskej práci bolo použité Arduino Uno ktoré používa 8-bitový mikrokontrolér ATmega328. Pomocou Arduina je mimo iné možné merať napätie od 0-5V. Mikrokontrolér rozdelí vstupný analógový signál na 1024 dielikov a podľa toho určí napätie. Podrobnejšie informácie sa dajú nájsť napríklad v [12].

Kapitola 2

Experiment

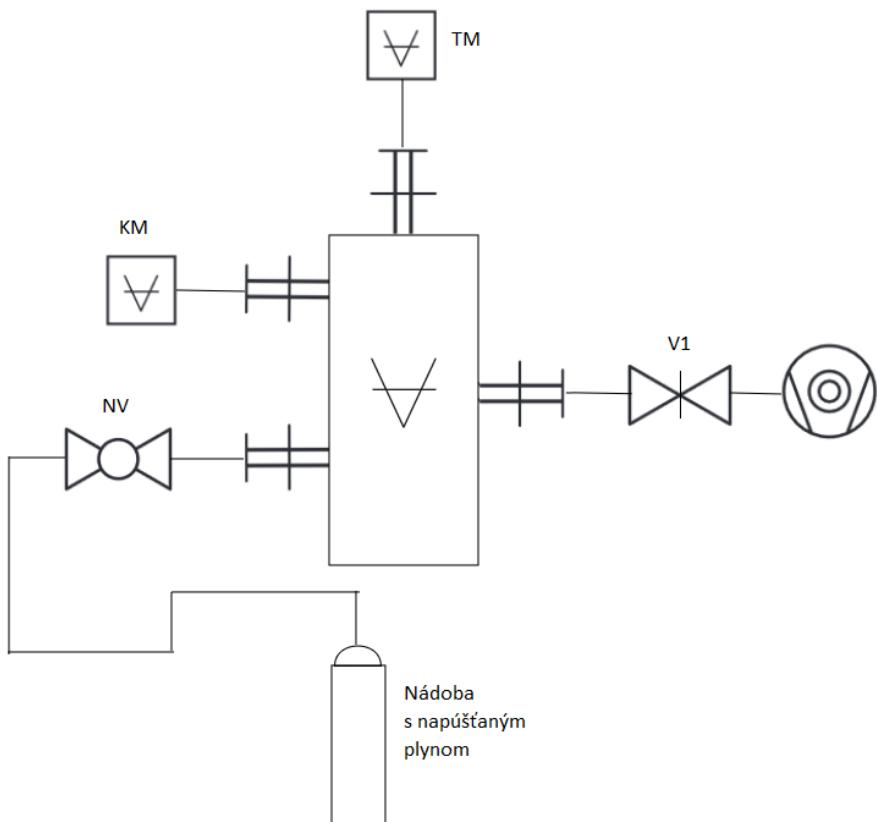
2.1 Účel experimentu

Hlavným cieľom tejto práce bolo praktické oboznámenie sa s vákuovou technikou a problémami ktoré sa pri jej navrhovaní a prevádzke často vyskytujú. Oboznámením sa s týmito problémami a ich riešením v praxi som sa naučil a prakticky precvičil mnohé veci ktoré prácu s vákuom sprevádzajú. Išlo prevažne o návrh a stavbu vákuovej aparátúry z poskytnutých komponentov, tak aby splňala všetky požadované podmienky. Hľadanie netesností, vypekanie aparátúry, či práca s poskytnutými meracími prístrojmi bola taktiež náplňou tohto experimentu.

V experimente sa zaoberám stavbou vákuovej aparátúry a jej využitím pre účely zapojenia a kalibrácie B-A ionizačnej vákuovej merky. Torzo tejto merky ktoré po-zostávalo zo skleneného obalu a potrebných kovových vlákien mi bolo poskytnuté. K tomu som mal navrhnúť a postaviť potrebné elektrické komponenty tak aby sa dala táto merka prevádzkovať a bolo s ňou možné merat. Jednalo sa o zapojenie elektrických zdrojov a elektrometrov, ich nastavenie na vhodné parametre a následné zmeranie chovania sa tejto merky pre rôzne nastavenia pri rôznych tlakoch.

2.2 Popis aparátúry

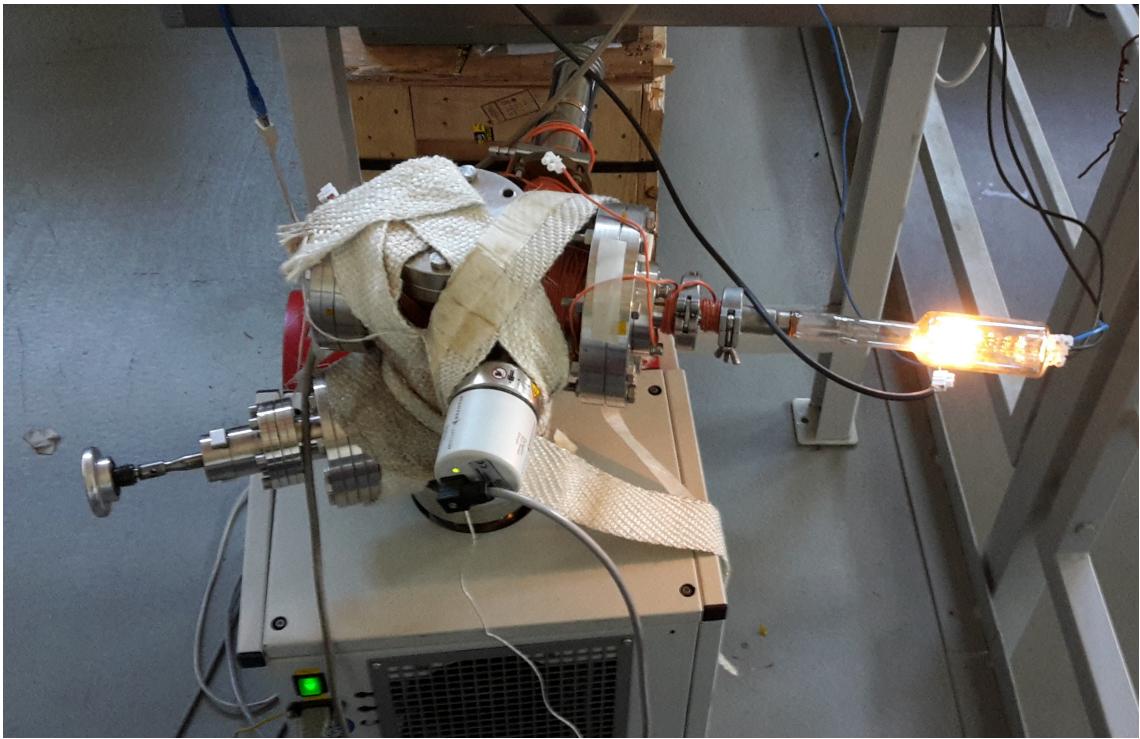
Ako prvé bolo potrebné postaviť z dostupných dielov vákuovú komoru a dosiahnuť v nej dostatočne nízky tlak aby bola vhodná na testovanie a kalibráciu mnou stavanej merky. Požiadavky boli, aby mala otvor na mnou stavanú merku, komerčnú merku (voči ktorej bola mnou stavaná kalibrovaná), napúšťací otvor na napúšťanie pracovného plynu (na kalibráciu merky pre rôzne druhy plynov) a samozrejme otvor na pripojenie čerpacej stanice. Medzi čerpacou stanicou a aparátúrou bol tak isto zaradený zatvárací ventil, na reguláciu tlaku (desorpciou zo stien aparátúry). Schéma použitej vákuovej aparátúry sa nachádza na Obr.(2.1). Na Obr.(2.2) sa nachádza fotka aparátúry. Použitá komerčná merka bola značky Pfeiffer, typ PKR 251 ktorá kombinuje Pirániho merku a Penningovu ionizačnú merku. Použitá čerpacia stanica značky Pfeiffer, model TSU 071 ktorá kombinovala turbomolekulárnu vývevu s



Obr. 2.1: Vákuová schéma použitej aparátúry. KM - komerčná merka, TM - testovaná merka, NV - napúšťací ventil, V1 - uzavírací ventil medzi čerpacou stanicou a čerpaným priestorom. Na čerpanie vákuu bola použitá čerpacia stanica značky Pfeiffer, model TSU 071.

predčerpaním rotačnou olejovou vývevou. Ako tesnenie medzi jednotlivými spojmi bola použitá guma. Pôvodný koncept počítal s medeným tesnením, no z časových dôvodov nedošlo k jeho výmene. Z toho dôvodu neboli dosiahnutý nižší tlak.

Potom ako bola postavená aparátúra a bol v nej dosiahnutý tlak rádovo 10^{-5} Pa som pristúpil k elektrickému zapojeniu mnou testovanej merky. Takto nízky tlak bol dosiahnutý niekoľkomesačným nepretržitým čerpaním a opakovaným vypekaním. V prípade výmeny gumového tesnenia za kovové (medené) a vypekaním na vyššie teploty ktoré kovové tesnenia umožňujú by sa tlak ešte znížil. Merku pre finálne meranie som zapájal podľa Obr.(2.3). Na napájanie som použil tri rôzne laboratórne zdroje. Ako zdroj žhavenia katódy bol použitý zdroj BASEtech BT-305. Ako zdroj predpäťia katódy bol použitý DIAMETRAL L240R51D. Ako zdroj predpäťia mriežky bol použitý Sorensen XHR 300-3.5. Na meranie finálnych parametrov bolo použité Arduino Uno ktoré používa 8-bitový mikrokontrolér ATmega328. Operačné zosilňovače boli typ TL072CP. Na ich napájanie bolo využívaných 12 nabíjateľných tužkových batérii. Potrebné komponenty (OZ, odpory) boli napájkované na prototypovej doske. Samotné torzo B-A merky bolo uzavorené v sklenenej banke s otvorom na pripojenie k vákuovej aparátúre. Ako vodiče boli použité klasické medené káble. Avšak

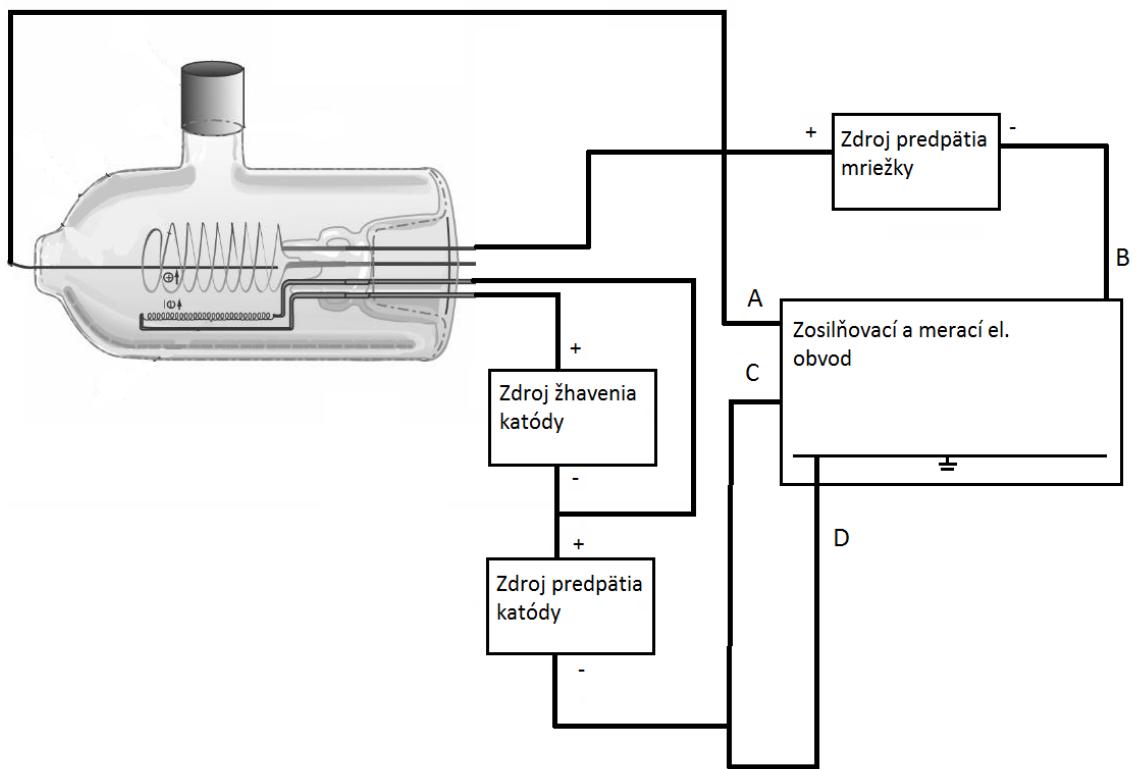


Obr. 2.2: Fotografia použitej vákuovej aparátúry.

vodič ktorý viedol iontový prúd medzi sklenenou bankou a zosilňovacím el. obvodom bol koaxiálny kábel. Dôvod použitia bolo zredukovanie elektrického šumu. Vnútorné vlákno kábla slúžilo ako vodič, vonkajšie slúžilo ako tienenie a bolo uzemnené na spoločnej zemi. Definovaním spoločnej zeme na jednom mieste som zaistil aby bol nízky elektrický šum.

2.3 Stavba aparátúry

Potom ako bola postavená vhodná vákuová aparátúra, som pristúpil k zapojeniu B-A merky. Spočiatku som ju zapojil podľa všeobecnej schémy na Obr.(1.9). Na meranie prúdov som použil multimeter OWON B35T. Elektrónový prúd (rádovo mA) neboli problém merať aj týmto multimetrom. Avšak rádovo nižší iontový prúd bol týmto multimetrom nememeriteľný. Vzhľadom na nedostupnosť citlivejšieho meracieho prístroja, bolo nutné vymyslieť spôsob ako merať aj takto malý prúd. Najjednoduchší sa zdal byť pomocou operačného zosilňovača, zapojeného ako transimpedančný zosilňovač. Dôvodom bola relatívna jednoduchosť zapojenia, veľmi nízka cena, a malé požadované napájanie. Týmto spôsobom som bol schopný jednoducho merať aj malý iontový prúd. Po tom čo bola za pomoci multimetrov overená funkčnosť zariadenia a očakávané chovanie pri zmenách tlaku (zmeny elektrónového a iontového prúdu) som sa rozhodol meranie zautomatizovať. Ručné odčítanie z multimetra mi neprišlo efektívne. Vhodným komponentom sa ukázalo byť zariadenie Arduino a to kvôli jeho relatívnej jednoduchosti a dostupnej cene. Keďže Arduino nie je schopné merať záporné napäťia, tak som za transimoedančný OZ zapojil ešte



Obr. 2.3: Nákres B-A merky spolu s jej elektrickým zapojením. Schéma el. obvodu sa nachádza na samostatnom obrázku 2.4. [7]

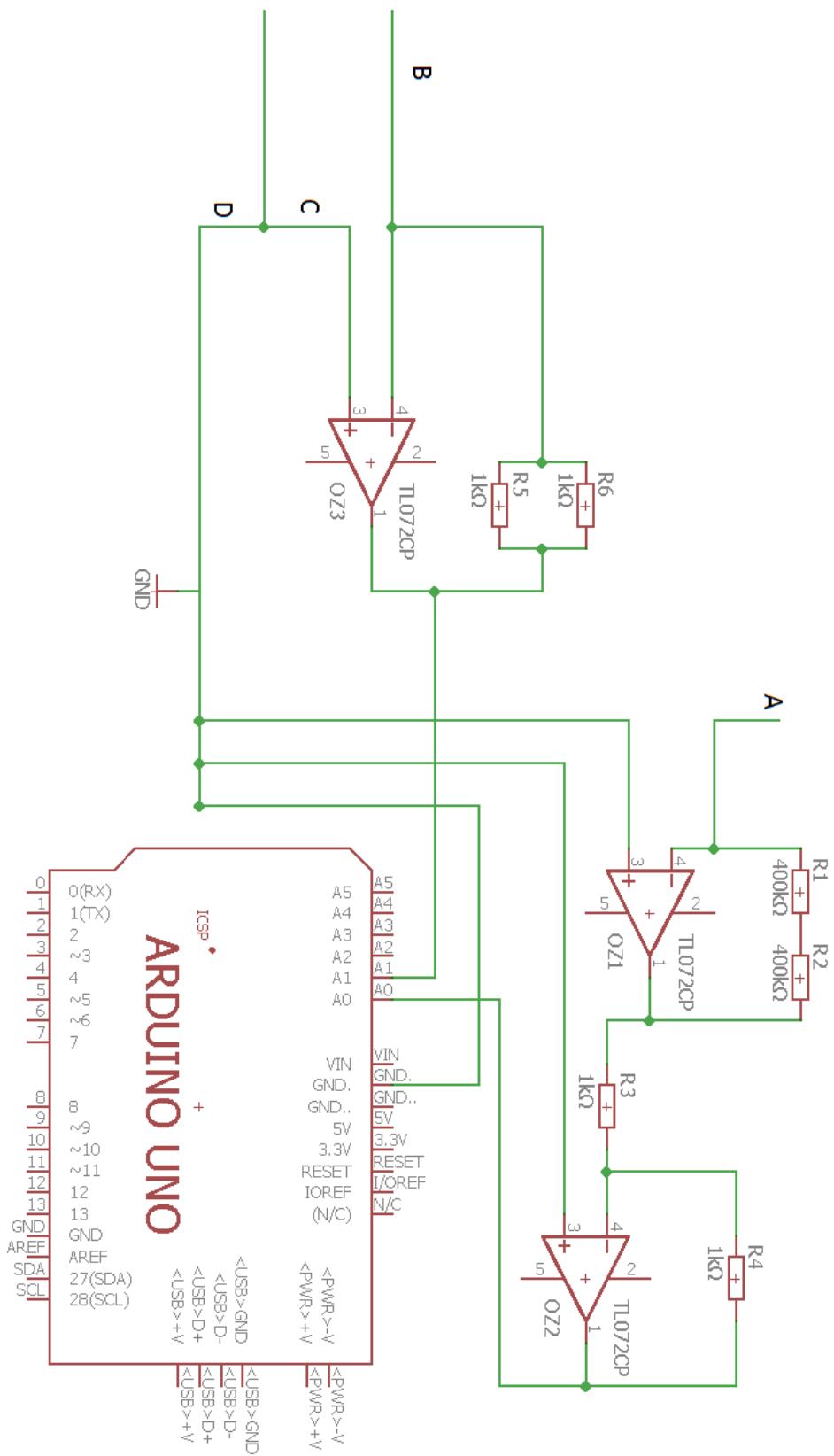
invertujúci OZ, v zosilnení 1:1 a to z dôvodu, že zosilňovač pred ním napätie tak isto invertoval. Keďže Arduino nedokáže merať prúd, ale iba napätie, bolo potrebné pridať transimpedančný OZ aj na miesto merania elektrónového prúdu. Kompletná schéma el. zapojenia sa nachádza na Obr.(2.4). K zapojeniu operačných zosilňovačov a potrebných odporov, som najprv používal tzv. nepájivé pole. Po overení funkčnosti som sa rozhodol miesto nepájivého poľa použiť prototypovú dosku ku ktorej som pripájkoval všetky potrebné súčiastky.

Samotné Arduino som naprogramoval tak, aby do pamäte načítalo 100 nameraných hodnôt a zobrazilo priemer z nich. Týmto spôsobom som mohol zobrazené dátá kopírovať priamo do excelu kde som ich ďalej spracovával a nemusel ich ručne odčítať z multimetera. Zdrojový kód ktorým som naprogramoval Arduino sa nachádza v prílohe.

2.4 Návrh vylepšenia experimentu

V nasledujúcej časti je popísaná časť experimentu ktorá nebola z časových dôvodov uskutočnená.

Jedným z problémov pri kalibrácii mnou stavanej B-A merky je používaná kalibračná



Obr. 2.4: Schéma el. zapojenia pomocou ktorého bolo merané napätie. Značky A, B, C, D súvisia so schémou 2.3.

merka. Používal som totiž ionizačnú Penningovu merku, ktorej presnosť je neznáma (výrobca udáva presnosť okolo 20%). Z toho dôvodu by bolo vhodné na kalibráciu použiť manometer ktorý meria tlak absolútne. Vzhľadom na vysokú presnosť by bolo možné použiť McLeodov kompresný manometer alebo kapacitnú membránovú merku. Ich nevýhodou je však schopnosť merať len do určitého tlaku, ktorý je vyšší než tlak ktorý som meral B-A merkou. Napriek tomu je možné ich použitie za istých predpokladov. Zo vzorca (1.1) vyplýva, že tlak závisí na počte častíc v objeme a teploty. Majme teda definovaný objem V_1 pri konštantnej teplote a so známym tlakom p_1 odmeraným absolútnym manometrom. Z toho vyplýva, že sme schopní približne určiť počet molekúl v danom priestore. Ak k objemu V_1 pripojíme známy objem V_2 s rátovo nižším tlakom (neznámym) a tým pádom zanedbateľným počtom molekúl, sme schopní približne určiť počet molekúl v spojenom objeme V . Platí, že $V = V_1 + V_2$. Z toho sme schopní dopočítať tlak v spojených nádobách (ďaleko nižší než aký sme schopní merať absolútne) a tým skalibrovať nepriamu merku. Pre objem V_1 platí:

$$n_1 = \frac{p_1}{kT}. \quad (2.1)$$

Pre spojený objem V platí:

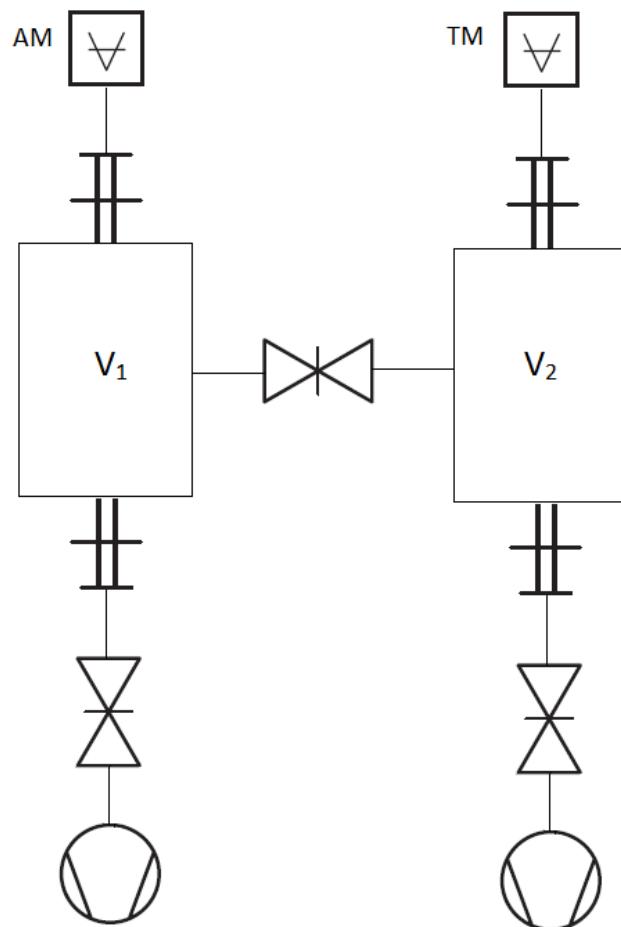
$$n = \frac{V_1 n_1}{V_1 + V_2}, \quad (2.2)$$

z čoho určíme konečný tlak p ako:

$$p = kT \frac{V_1 n_1}{V_1 + V_2} = \frac{V_1 p_1}{V_1 + V_2}. \quad (2.3)$$

Schéma zapojenia ktorú by som použil pre toto meranie sa nachádza na Obr.(2.5).

Ako je zjavné z rovnice (2.3), vhodným zvolením objemov V_1 a V_2 sme schopní absolútne merať aj veľmi nízke tlaky. Napríklad, ak by sme zvolili veľkosť objemu $V_2 = 1000 \cdot V_1$, sme pomocou McLeodovho manometra schopní zmerať tlak až do 10^{-6} Pa.



Obr. 2.5: Schéma vákuovej aparátúry pre priame meranie tlaku. AM - absolútна merka, TM - testovaná merka.

Kapitola 3

Namerané hodnoty

3.1 Spôsob spracovania výsledkov

Tabuľky s nameranými hodnotami sa nachádzajú v prílohe, v zadnej časti.

Jedným z cieľov tejto bakalárskej práce bolo zistiť chovanie merky pre rôzne zvolené hodnoty nastavenia napájacích zdrojov pri rôznych tlakoch a nájsť ich optimálne hodnoty, potvrdiť či vyvrátiť hodnoty doporučené výrobcom [9]. Premierať závislosť iontového a elektrónového prúdu na týchto parametroch a zistiť kalibračnú konštantu merky-vzorec (1.10). Tak isto nájsť kalibračné konštanty pre rôzne plyny a porovnať ich s tabuľkovými Tab.(1.2).

Ako prvé som meral hodnoty iontového a elektrónového prúdu pre rôzne hodnoty zapojených zdrojov pri rôznych tlakoch. Vychádzal som z doporučených hodnôt pre B-A merky [9]. Ako bolo spomínané v časti stavba aparátúry, v skutočnosti som nemeral priamo prúd ale napätie medzi zemou a výstup OZ. Ked'že výsledný tlak závisí na pomere týchto dvoch hodnôt podľa vzorca (1.10), namerané napäcia som ďalej neprerátaval na prúd. V nasledujúcich tabuľkách a grafoch budú preto uvádzané hodnoty U_i ako napätie iontové, a U_e ako napätie elektrónové, pričom platí jednoduchý vzťah medzi napätim a prúdom vychádzajúci z elektrického zapojenia (vid'. Stavba aparátúry):

$$I_i = \frac{U_i}{R_i} \quad I_e = \frac{U_e}{R_e}, \quad (3.1)$$

kde $R_i = 800\text{k}\Omega$ a $R_e = 0,5\text{k}\Omega$ sú hodnoty odporov vychádzajúce z elektrického zapojenia na Obr.(2.4).

V hodnotách tlaku som sa pohyboval medzi mojím medzným tlakom (okolo $4,8 \cdot 10^{-5}\text{Pa}$) a 10^{-2}Pa a to z dôvodu aby nedošlo k spáleniu merky. Tlak bol regulovaný jednako ventilom medzi aparátúrou a vývevou, a napúšťacím ventilom.

Chybu merania pre merané napätie som odhadol z chyby meracieho prístroja (Arduino uno). Pri meraní analógového signálu ho Arduino rozdelí na 1023 dielikov, od 0 do +5 voltov, čo dáva presnosť okolo $\pm 0,005\text{V}$. Avšak pri praktickom overení sa

toto ukázalo byť ako zavádzajúce a meraný signál mal oveľa väčší rozptyl. Z toho dôvodu som Arduino naprogramoval tak, aby ukazoval len priemer z každých 100 nameraných hodnôt, čo značne zvýšilo presnosť a stabilitu udávaných výsledkov. Udávané výsledky pri takomto nastavení sa zobrazovali na dve desatinné miesta. Na druhom desatinnom mieste to však ani v tomto prípade nebolo úplne stabilné, čo môže byť spôsobené limitou presnosťou Arduina ale tak isto aj rôznym elektrickým šumom v obvode. Z toho dôvodu som sa rozhodol odhadnúť chybu priameho merania na $\pm 0,007\text{V}$.

Chybu nepriameho merania som spočítal podľa vzorca:

$$\sigma_\mu = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \dots}, \quad (3.2)$$

kde f je funkcia z ktorej počítame danú hodnotu a $x, y, z\dots$ sú namerané parametre a $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z\dots$ sú ich chyby. Po dosadení $f = U_i/U_e$ dostaneme konečnú rovnicu pre počítanie absolútnej chyby nepriameho merania pre podiel týchto dvoch meraných hodnôt:

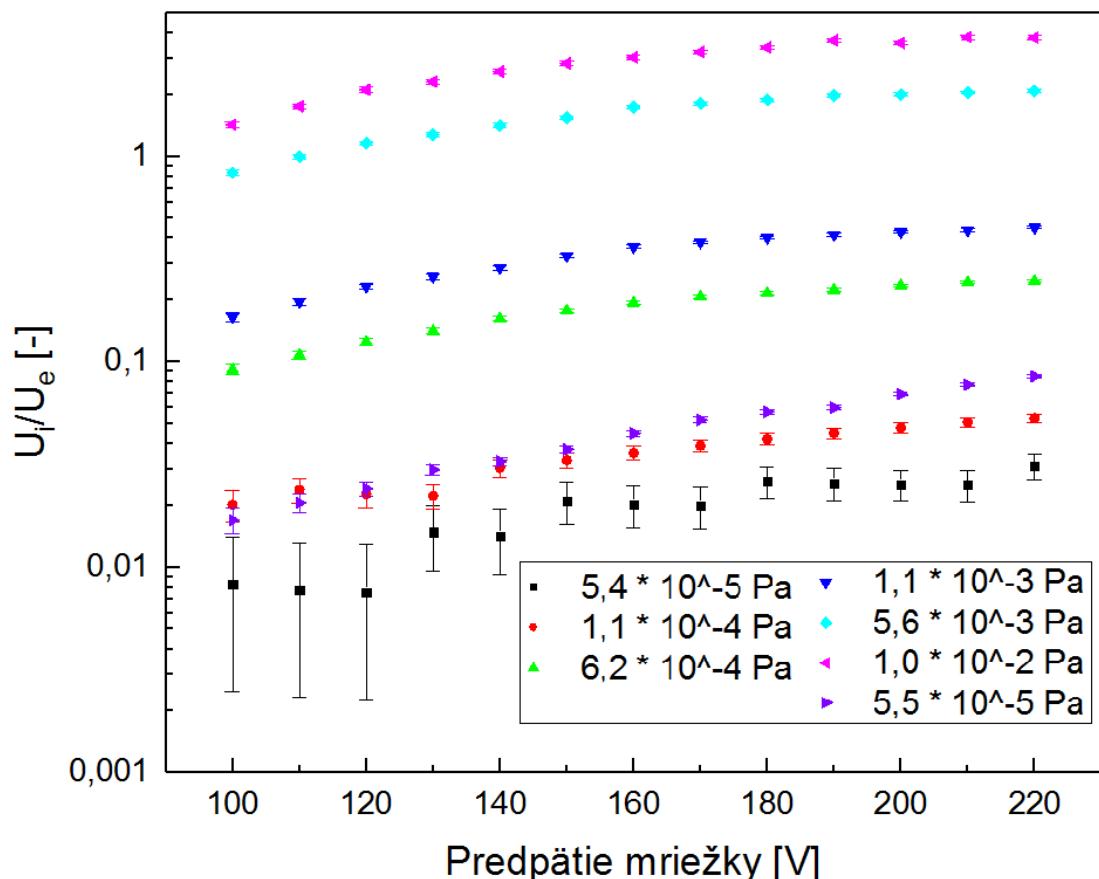
$$\sigma_{U_i/U_e} = \sqrt{\left(\frac{1}{U_e}\right)^2 \sigma_{U_i}^2 + \left(-\frac{U_i}{U_e^2}\right)^2 \sigma_{U_e}^2}, \quad (3.3)$$

3.2 Hodnoty v závislosti na predpäti mriežky

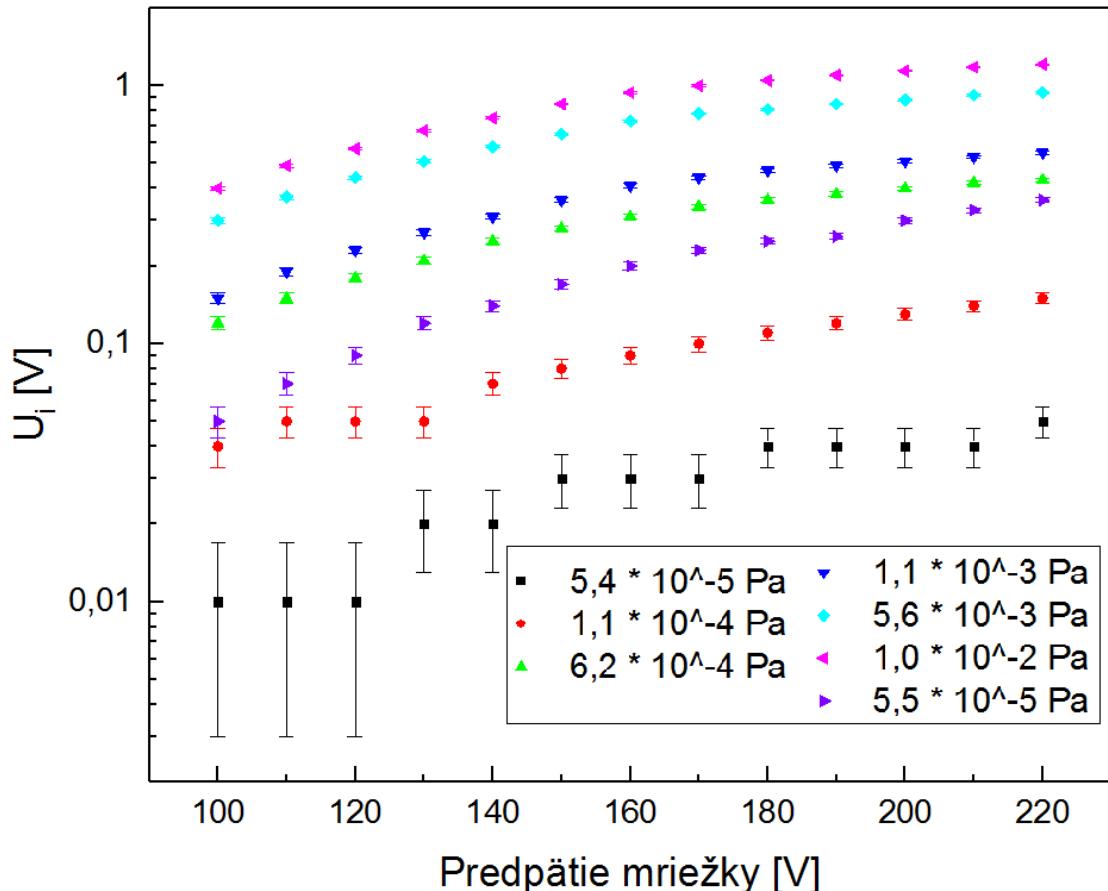
Ako prvé som meral hodnoty v závislosti na predpäti mriežky, teda napäti ktoré je na špirále a príťahuje k sebe elektróny. Udávaná doporučená hodnota je $+180\text{V}$. Ja som premeriaval hodnoty od $+100\text{V}$ do $+220\text{V}$ a sledoval chovanie parametrov pre 6 rôznych tlakov. Hodnoty predpäťia katódy a žhaviaceho prúdu som nastavil na doporučené. Pre predpätie katódy som použil hodnotu $+30\text{V}$ a pre žhaviaci prúd som nastavil $2,7\text{A}$. Ked'že chyba merania pri najnižšom tlaku bola pri týchto parametroch príliš veľká, rozhodol som sa premerať medzný tlak pri vyššom žhaviacom napäti $2,8\text{A}$. Namerané a vypočítané hodnoty sa nachádzajú v Tab.(A.1 - A.7), ich grafické znázornenie sa nachádza na Obr.(3.1 - 3.3). Ako je z grafov vidieť, so zvyšujúcim sa napätim vzrastajú aj namerané hodnoty. Výhodou je, že ich tým pádom môžeme jednoduchšie a s menšou chybou zmerať aj pri nízkych tlakoch. Tak isto z týchto závislostí vyplýva, že v prípade ak nebude dostupný dostatočne silný zdroj napäcia, je možné použiť aj slabší zdroj, zvýsi sa tým však nepresnosť merania.

3.3 Hodnoty v závislosti na žhaviacom prúde

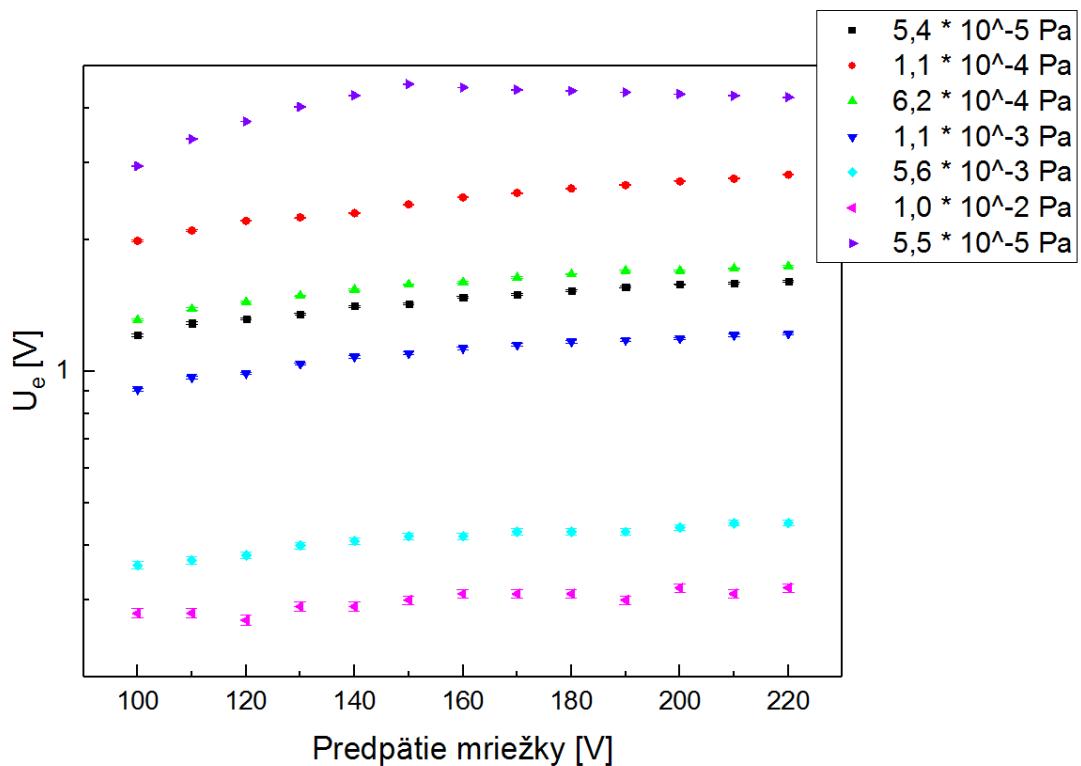
Ďalej som meral závislosti iontového a elektrónového napäcia na žhaviacom prúde. Premeriaval som hodnoty od 2A do $2,9\text{A}$ a sledoval chovanie parametrov pre 6 rôznych tlakov. Merat nižšie prúdy nemalo zmysel, ked'že žhaviaca katóda neprodukovala dostatok elektrónov. Vyššie hodnoty som nemeral kvôli možnému poškodeniu



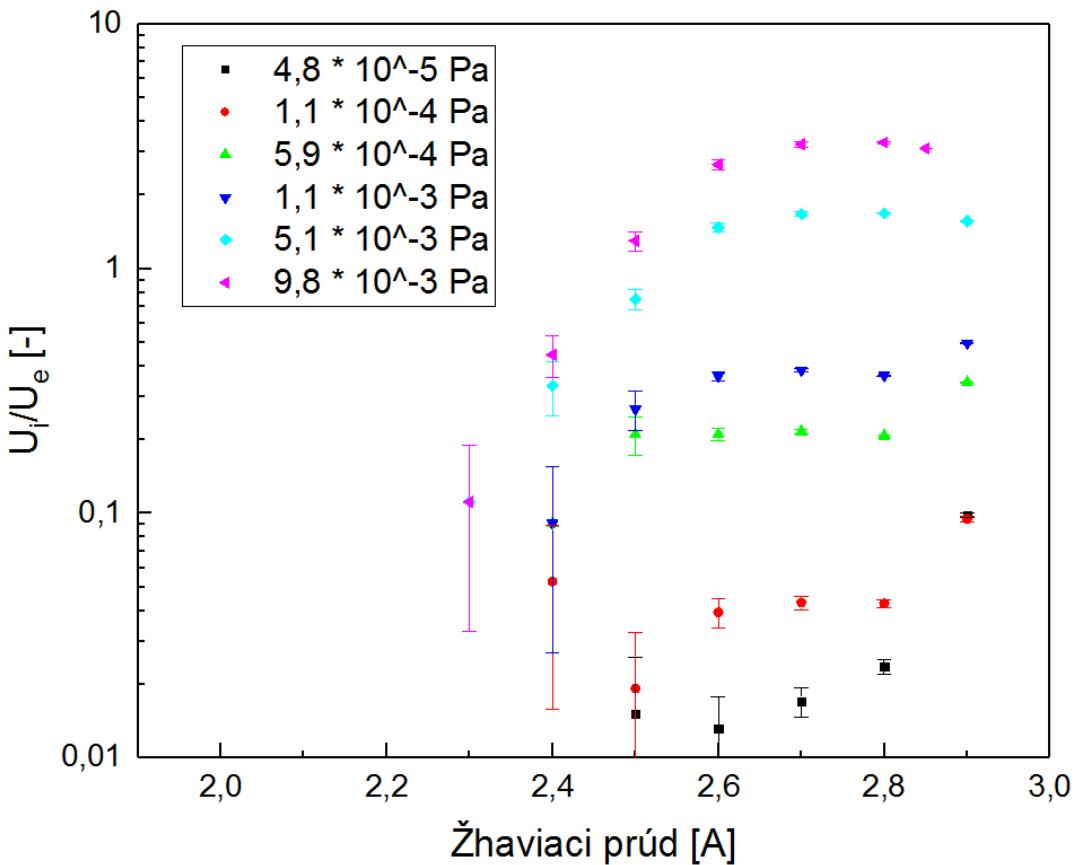
Obr. 3.1: Závislosť podielu nameraných parametrov U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V. Žhaviaci prúd bol 2,7A pre prvých 6 tlakov. Pre tlak $5,5 \cdot 10^{-5}$ Pa bol nastavený žhaviaci prúd 2,8A aby sa zvýšil elektrónový a iontový prúd a tým pádom aj presnosť. Chyba merania bola počítaná podľa vzorca (3.3).



Obr. 3.2: Závislosť nameraných hodnôt U_i na hodnote predpätí mriežky pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V. Žhaviaci prúd bol 2,7A pre prvých 6 tlakov. Pre tlak $5,5 \cdot 10^{-5}$ Pa bol nastavený žhaviaci prúd 2,8A aby sa zvýšil elektrónový a iontový prúd a tým pádom aj presnosť. Chyba merania bola určená odhadom.



Obr. 3.3: Závislosť nameraných hodnôt U_e na hodnote predpätí mriežky pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V. Žhaviaci prúd bol 2,7A pre prvých 6 tlakov. Pre tlak $5,5 \cdot 10^{-5}$ Pa bol nastavený žhaviaci prúd 2,8A aby sa zvýšil elektrónový a iontový prúd a tým pádom aj presnosť. Chyba merania bola určená odhadom.

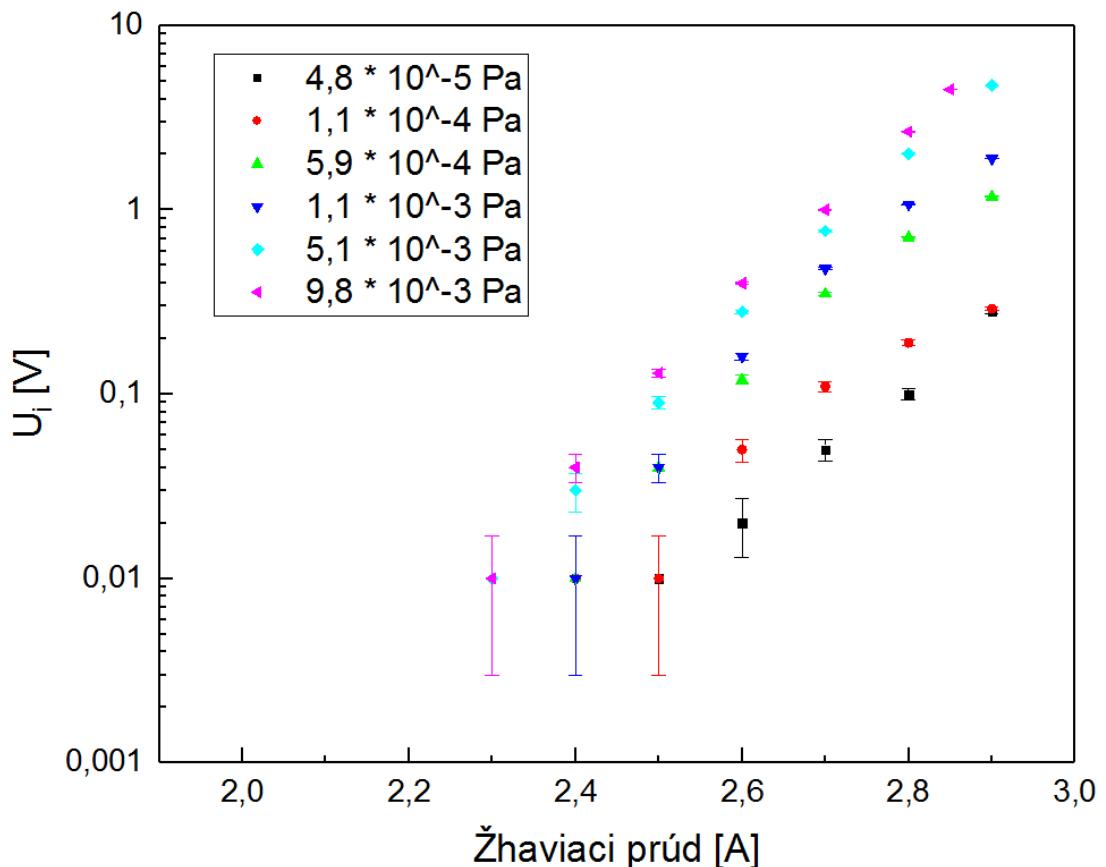


Obr. 3.4: Závislosť podielu nameraných parametrov U_i/U_e na hodnote žhaviaceho prúdu pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola počítaná podľa vzorca (3.3).

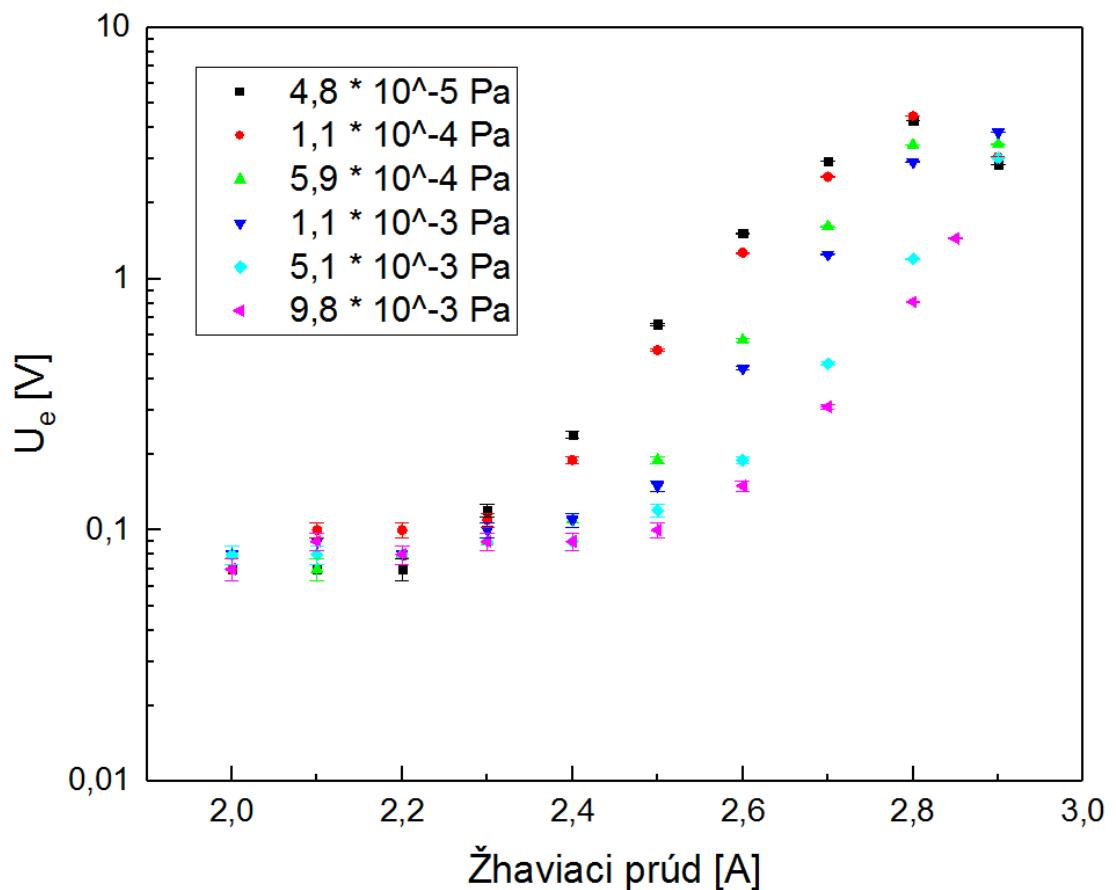
katódy. Z predchádzajúcich skúšobných meraní, pri nastavení vysších hodnôt prúdov došlo k začierneniu skla v ktorom je uložená merka a bola obava, že sa veľmi rýchlo poškodí a zničí. Hodnoty predpäťia katódy a predpäťia mriežky som nastavil na doporučené. Pre predpätie katódy som použil hodnotu +30V a pre predpätie mriežky +180V. Namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab.(B.1 - B.6), ich grafické znázornenie sa nachádza na Obr.(3.4-3.6). Ako je z grafov vidieť, je potrebné nastaviť prúd aspoň 2,5A aby bolo možné nameráť nejaké prúdy pri najnižšom tlaku. Z Obr.(3.4) je však vidieť stabilná oblasť, medzi 2,6A - 2,8A. Túto oblasť preto považujem za ideálnu pre nastavenie žhaviaceho prúdu.

3.4 Hodnoty v závislosti na predpäti katódy

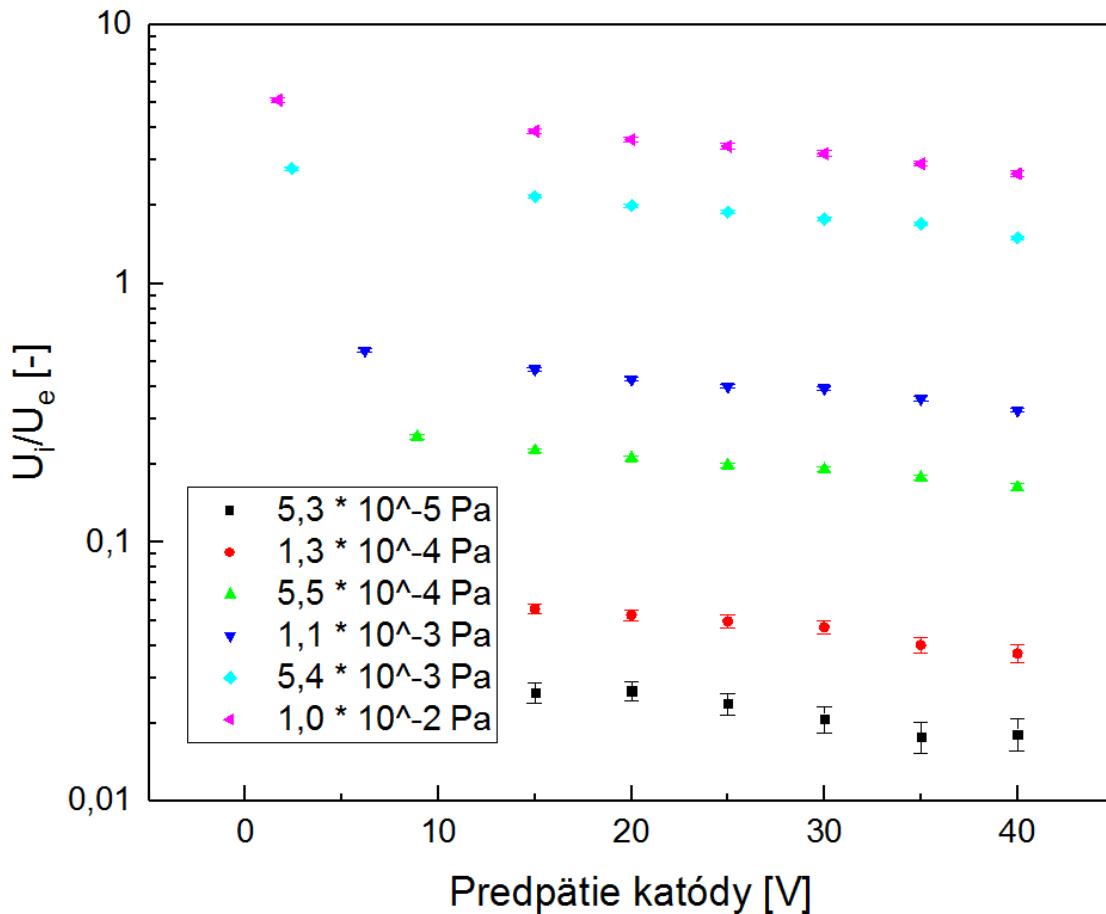
Ako poslednú som meral závislosť na predpäti katódy. Zistil som, že aj keď som nastavil jej hodnotu na najnižšiu možnú, stále bola nenulová a pre rôzne tlaky iná. To môže byť spôsobené napäťím z iných zdrojov. V prípade, že som obvod zapojil bez tohto zdroja, bolo moje namerané iontové napätie nulové. Podobne ako



Obr. 3.5: Závislosť nameraných hodnôt U_i na hodnote žhaviaceho prúdu pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola určená odhadom.



Obr. 3.6: Závislosť nameraných hodnôt U_e na hodnote žhaviaceho prúdu pri rôznych tlakoch. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola určená odhadom.

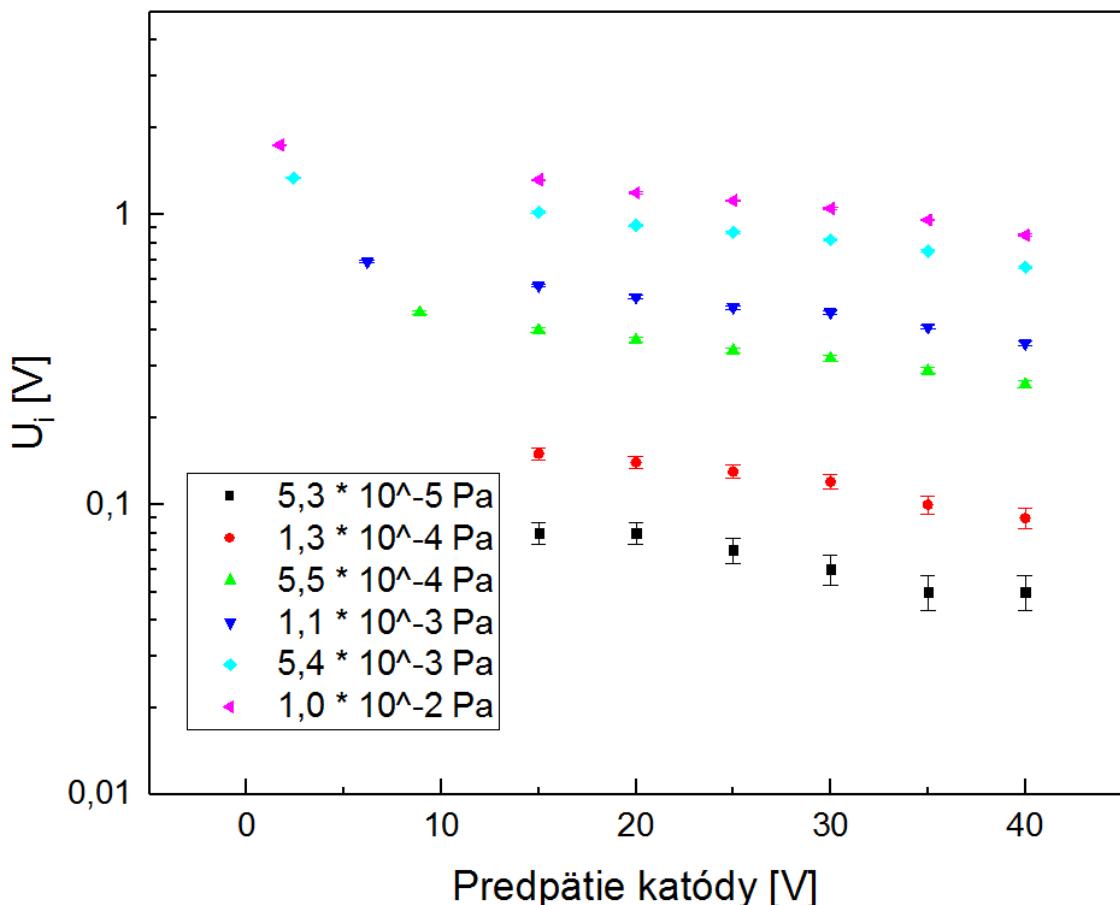


Obr. 3.7: Závislosť podielu nameraných parametrov U_i/U_e na predpätí katódy pri rôznych tlakoch. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola počítaná podľa vzorca (3.3).

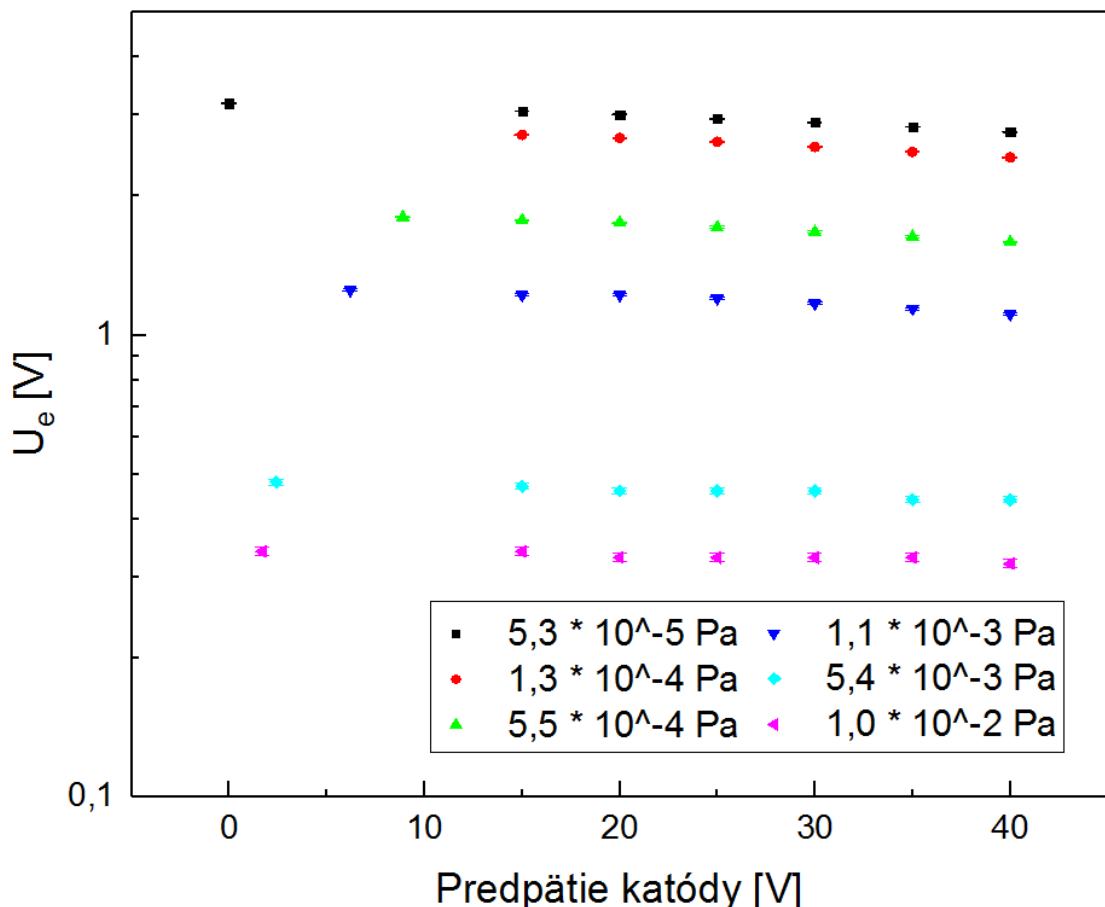
v minulých prípadoch, som nastavil zvyšné hodnoty na doporučené. Pre predpätie mriežky som použil hodnotu +180V a pre žhaviaci prúd 2,7A. Namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab.(C.1 - C.6), ich grafické znázornenie sa nachádza na Obr.(3.7 - 3.9). Ako je vidieť, namerané hodnoty sú vcelku stabilné pre všetky použité napäcia a tlaky. Nie je patrný veľký rozdiel medzi použitím napäťia +20V a +40V. Avšak ako je vidieť, čím nižší tlak, tým vyššie bolo najmenšie možné nastaviteľné napätie. Predpokladám, že pre ešte nižšie tlaky by sa tieto napäťia zvyšovali, preto si myslím, že je v zdrojoch uvádzaná odporúčaná hodnota +30V.

3.5 Kalibračné hodnoty

Ďalej som nastavil hodnoty merky na doporučené tj. žhaviaci prúd na 2,7A, predpätie katódy na +30V a predpätie mriežky na +180V. Cieľom tohto merania bolo zistiť závislosť medzi pomerom U_i/U_e a tlakom (vzorec (1.10)). Nafigovaním nameraných dát lineárnom funkciou som získal predpis na určenie tlaku v aparátúre z nameraných



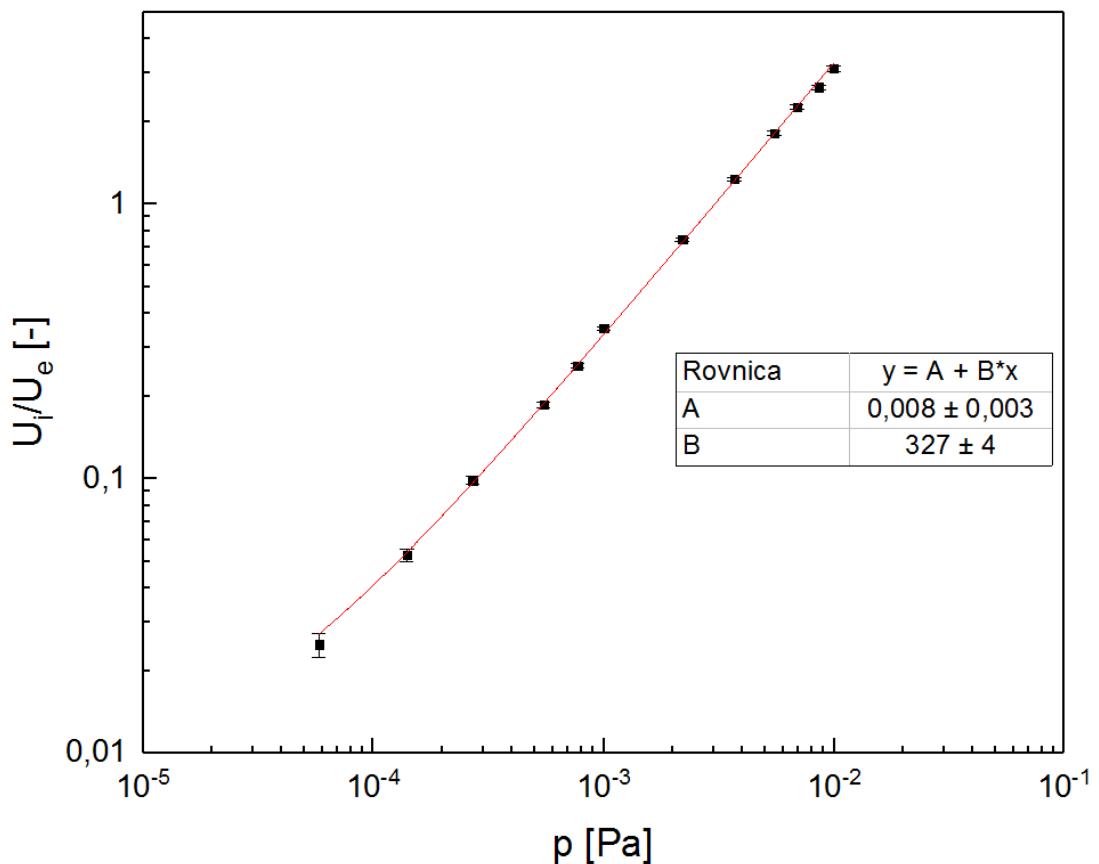
Obr. 3.8: Závislosť podielu nameraných parametrov U_i na predpätí katódy pri rôznych tlakoch. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola určená odhadom.



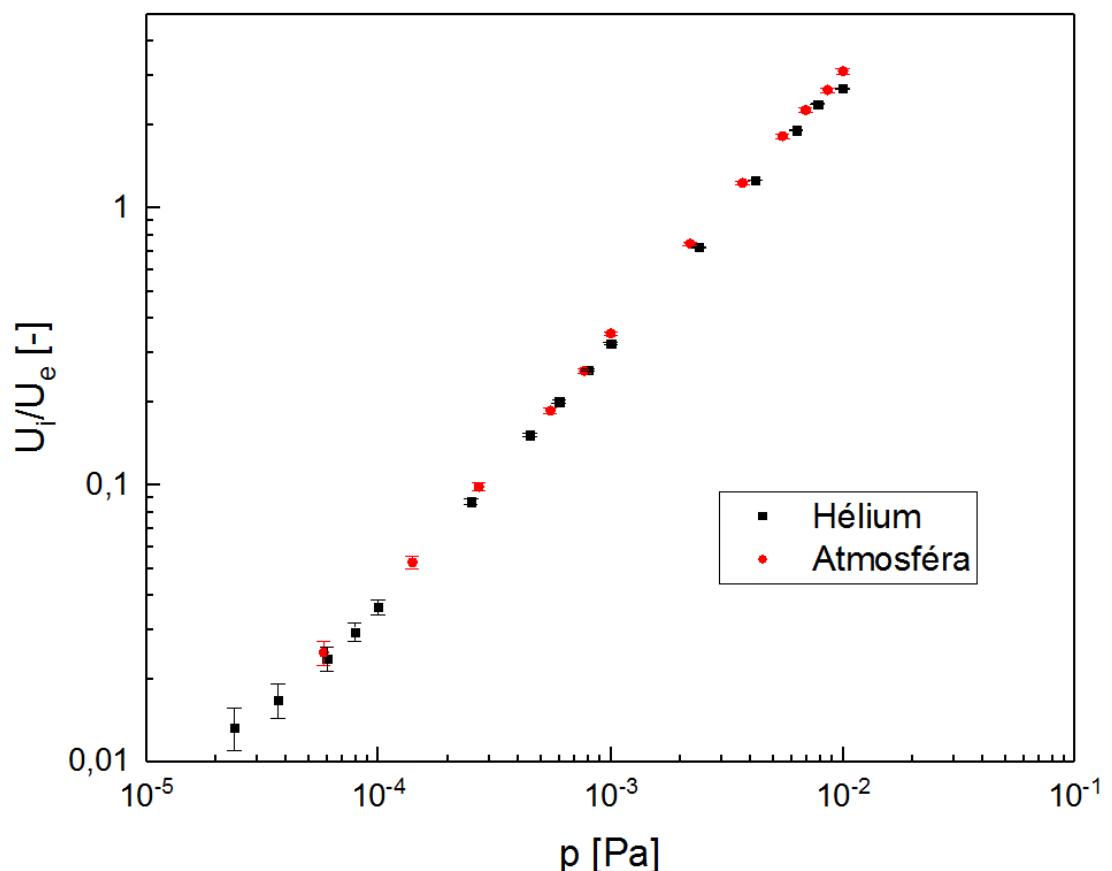
Obr. 3.9: Závislosť podielu nameraných parametrov U_e na predpätí katódy pri rôznych tlakoch. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V. Chyba merania bola určená odhadom.

hodnôt napäťia. Na fitovanie som použil program originLAB. Dáta sa nachádzajú v Tab.(D.1). Fitovaná funkcia má hodnotu $f(p) = (0,008 \pm 0,003) + (327 \pm 4)p$. Grafické znázornenie sa nachádza na Obr.(3.10). Určením tejto závislosti som získal spôsob, ako túto merku využiť pre meranie tlaku na základe nameraných hodnôt U_i a U_e . Presnejšie určenú závislosť by som mohol získať použitím presnejšieho spôsobu merania týchto napäťí. Tak isto je potrebné si uvedomiť, že v skutočnosti nepoznám chybu s akou bol zmeraný tlak použitou komerčnou Penningovou merkou. Presné zmeranie by bolo možné použitím absolútnej merky - viz. časť 2.4.

Ako posledné som spravil korekciu na plyn, konkrétnie hélium. Z technických dôvodov to bol jediný plyn pre ktorý som hľadal faktor korekcie na plyn. Namerané hodnoty sa nachádzajú v Tab.(D.2). Ako je vidieť z grafu na Obr.(3.11), hodnoty namerané s héliom sa kryjú s tými ktoré boli nemerané pri atmosfére. Ked'že tlak bol meraný komerčnou Penningovou ionizačnou merkou, a pomer U_i/U_e mnou stavanou B-A ionizačnou merkou, môžeme povedať, že faktory korekcie Penningovej a mnou stavanej B-A merky sa zhodujú. Ich hodnoty môžeme nájsť v [10]. Ako je však vidieť pri porovnaní ich hodnôt s inými zdrojmi (napríklad [1]), nemôžme ich považovať za úplne presné. To je dané najmä tým, že deklarovaná presnosť týchto meriek sa pohybuje okolo $\pm 20\%$. Tak isto je potrebné vziať do úvahy, že hélium v aparátúre nebolo úplne čisté, ale zmiešané so zostatkovým plynom ktorý sa nachádzal v aparátúre.



Obr. 3.10: Závislosť podielu iontového a elektrónového napäťa na tlaku pri doporučených parametroch, spolu s fitovacou krivkou a jej parametrami.



Obr. 3.11: Závislosť podielu iontového a elektrónového napäťa na tlaku pri doporučených parametroch pre atmosféru a hélium.

Záver

Ako prvé som postavil vákuovú aparáturu v ktorej som dosiahol tlak rádovo 10^{-5} Pa. Potom som sa pustil do samotného elektrického zapájania testovanej B-A merky. Vychádzal som zo schémy na Obr.(1.9). Na napájanie som použil dostupné laboratórne zdroje a na meranie prúdov dostupné multimetre. Ako prvým problémom sa ukázal byť zdroj predpäťia mriežky, ktorý pri nastavenom napätí +180V nedokázal zniest vysoký elektrónový prúd a napätie sám znižoval. Bolo teda potrebné získať silnejší zdroj, keďže som potreboval zmerať chovanie závislostí nameraných hodnôt na tomto predpäti aj pre väčšie hodnoty. Potom čo bol tento problém vyriešený sa ukázal byť problém merania prúdu pomocou bežného multimetru. Ten nedokázal zmerať veľmi malý iontový prúd ktorý bol v rádoch nano ampérov. Bolo teda potrebné vymyslieť spôsob ako merať aj takto nízky prúd, keďže ampérmetr schopný merať takto nízke prúdy neboli dostupní. Po zvažovaní možných spôsobov som sa nakoniec rozhodol pre použitie operačného zosilňovača v transimpedančnom zapojení.

Dôvodov takéhoto riešenia bolo niekoľko. Za prvé to bola dostupnosť obyčajných OZ vďaka ich nízkej cene. Tak isto neboli problém s napájaním, keďže stačilo niekoľko tužkových bateriek. Zapojenie samotné, ktoré vyžadovalo len samotný OZ, jeho napájanie a dostatočne veľký odpor bolo tak isto veľmi jednoduché. Meranie napäcia medzi výstupom a zemou som mohol uskutočniť s dostupným multimetrom ktorým neboli problém toto napätie zmerať.

Ďalší problém som si uvedomil pri zapisovaní výsledkov zo skúšobných meraní. Odčítanie hodnôt z multimeterov bolo pracné a pomalé. Bolo preto potrebné vymyslieť spôsob ako získavanie výsledkov zautomatizovať. Rozhodol som as použiť preto mikrokontrolér Arduino Uno. Dôvodom bola dostupná cena a tak isto veľmi široká škála využitia. Arduino je pri správnom zapojení a naprogramovaní schopné merať napätie od 0-5V, čo bolo pre moje potreby dostačujúce. Transimpedančný OZ som použil aj pre meranie elektrónového prúdu, vhodným zvolením odporu som nemal problém trafiť sa do potrebného rozsahu 0-5V. Kompletná schéma zapojenia sa nachádza na Obr.(2.3 a 2.4). Namerané hodnoty sa zobrazovali priamo v počítači a neboli teda problém jednoducho ich použiť k ďalšiemu spracovaniu.

Použitie Arduina otvorilo cestu k ďalším možným riešeniam. Pri pripojení displaya k Arduinu a vhodnom naprogramovaní by bolo možné z nameraných hodnôt, po potrebnej kalibrácii samozrejme, určovať tlak v reálnom čase tak ako to robí komerčná merka. Toto bola jedna z plánovaných vecí, ktorá sa však z nedostatku času nestihla. Namerané hodnoty a chovanie merky však dokazujú, že je to možné.

Z nameraných výsledkov som zistil chovanie merky pri rôznych nastavených napätiach pri rôznych tlakoch. Ako je vidieť z grafov na Obr. (3.1 - 3.3) so zvyšujúcim sa predpäťím mriežky vzrastajú aj namerané hodnoty napäti. Výhodou je, že ich tým pádom môžeme jednoduchšie a s menšou chybou zmerať aj pri nízkych tlakoch. Tak isto z týchto závislostí vyplýva, že v prípade ak nebude dostupný dostatočne silný zdroj napäcia, je možné použiť aj slabší zdroj, zvýši sa tým však nepresnosť merania.

Z grafov na Obr. (3.4 - 3.6) je vidieť závislosť nameraných napäti na žhaviacom prúde. Je zjavné, že aby došlo k účinnému emitovaniu elektrónov a následnej ionizácii, musí cez katódu prechádzať dostatočný prúd. V grafe na Obr.(3.4) je však vidieť stabilná oblasť, medzi 2,6A - 2,8A. Túto oblasť preto považujem za ideálnu pre nastavenie žhaviaceho prúdu pre tlaky od 10^{-2} do 10^{-4} Pa. Pre nižšie tlaky by bolo ideálne tento prúd ešte o niečo zvýšiť, aby boli aj takto nízke tlaky lepšie merateľné. Pri príliš vysokom prúde by však mohlo dôjsť k spáleniu katódy. Komerčne dostupné B-A merky si z toho dôvodu tento prúd sami regulujú.

Závislosť na predpäti katódy je znázornená na Obr.(3.7 - 3.9). Ako je vidieť, namerané hodnoty sú vcelku stabilné pre všetky použité napäcia a tlaky. Nie je patrný veľký rozdiel medzi použitím napäcia +20V a +40V. Avšak ako je vidieť, čím nižší tlak, tým vyššie bolo najmenšie možné nastaviteľné napätie. Predpokladám, že pre ešte nižšie tlaky by sa tieto napäcia zvyšovali, preto si myslím, že je v zdrojoch uvádzaná odporúčaná hodnota +30V.

Pre potreby skutočného použitia, bolo potrebné nielen nájsť vhodné hodnoty použitých napäti, ale taktiež zistiť závislosť medzi nameranými hodnotami a tlakom. Z meraní som si overil, že doporučené hodnoty napäti sú vhodné pre praktické použitie. Použil som preto napätie +180V na predpätie mriežky , +30V na predpätie katódy a 2,7A ako žhaviaci prúd. Závislosť medzi pomerom U_i/U_e a tlakom p som nafitoval lineárnu funkciu $f(p) = (0,008 \pm 0,003) + (327 \pm 4)p$. Grafické znázornenie sa nachádza na Obr.(3.10). Určením tejto závislosti som získal spôsob, ako túto merku využiť pre meranie tlaku na základe nameraných hodnôt U_i a U_e . V prípade pripojenia displaya k Arduinu, tak ako bolo spomínané vyššie by som tím získal plne funkčnú a použiteľnú merku.

Ako posledné som spravil korekciu na plyn, konkrétnie hélium. Z technických dôvodov to bol jediný plyn pre ktorý som hľadal faktor korekcie na plyn. Ako je vidieť z grafu na Obr.(3.11), hodnoty namerané s héliom sa kryjú s tými ktoré boli nemerané pri atmosfére. Ked'že tlak bol meraný komerčnou Penningovou ionizačnou merkou, a pomer U_i/U_e mnou stavanou B-A ionizačnou merkou, môžeme povedať, že faktory korekcie Penningovej a mnou stavanej B-A merky sa zhodujú. Ich hodnoty môžeme nájsť v [10]. Ako je však vidieť pri porovnaní ich hodnôt s inými zdrojmi (napríklad [1]), nemôžme ich považovať za úplne presné. To je dané najmä tým, že deklarovaná presnosť týchto meriek sa pohybuje okolo $\pm 20\%$. Tak isto je potrebné vziať do úvahy, že hélium v aparátúre nebolo úplne čisté, ale zmiešané so zostatkovým plynom ktorý sa nachádzal v aparátúre.

Presnejšie výsledky závislostí napäti na tlaku by sa dali dosiahnuť presnejším spôsobom merania napäcia (napríklad použitím viac bitového mikro čipu v Arduine). Taktiež komerčná Penningova merka na meranie tlaku nieje veľmi presná. Ako bolo

spomínané, udávaná presnosť je okolo $\pm 20\%$. Presnejšie hodnoty tlaku by sa dali získať použitím absolútnej merky tak ako je to popísané v časti 2.4. V tejto časti som navrhhol spôsob ako merať aj tlaky v oblasti vysokého vakuu absolútne a tým skalibrovať testovanú B-A merku.

Literatúra

- [1] Dr. Walter Umrath *Fundamentals of Vacuum Technology*. Cologne. 1998.
- [2] Ing. Jaroslav Král CSc *Cvičení z vakuové techniky*. Praha. Vydavatelstvý ČVUT 1996.
- [3] Dorothy M. Hoffman, John H. Thomas, Bawa Singh *Handbook of Vacuum Science and Technology*. Elsevier Science Technology Books 1997.
- [4] Nagamitsu Yoshimura *Vacuum Technology, Practice for Scientific Instruments*. Berlin. Springer 2008.
- [5] J.H. Moore *Building scientific apparatus*. Cambridge University Press. 2009.
- [6] Paul Scherz *Practical Electronics for Inventors*. McGraw-Hill 2000.
- [7] Stanford Research Systems [online] [cit.13.6.2017]
<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/ApplicationNotes/IG1BAGapp.pdf>
- [8] Introduction to Bayard-Alpert Ionization Gauges [online] [cit.13.6.2017]
<http://mmrc.caltech.edu/Vacuum/Teledyne%20Hastings/Ion%20Gauges.pdf>
- [9] Pressure and Vacuum Measurement Solutions [online] [cit.13.6.2017]
<https://www.mksinst.com/docs/UR/GP-160827-274Gauges-DS.pdf>
- [10] Compact FullRange Gauge PKR 251 - Operating Instructions [online]
[cit.13.6.2017]
http://www.idealvac.com/files/brochures/Pfeiffer_PKR_251_Pirani_ColdCathode.pdf
- [11] Wikipedia - Turbomolecular pump [online] [cit.13.6.2017]
https://en.wikipedia.org/wiki/Turbomolecular_pump
- [12] Arduino [online] [cit.13.6.2017]
<https://www.arduino.cc/>
- [13] Theoretical Determination of Absolute Electron-Impact Ionization Cross Sections of Molecules [online] [cit.13.6.2017]
https://www.researchgate.net/publication/222133663_Theoretical_Determination_of_Absolute_Electron-Impact_Ionization_Cross_Sections_of_Molecules

Dodatok A

Tabuľky s nameranými a
vyrátanými hodnotami závislostí
na predpätí mriežky a tlaku.

$p = 5,4 \cdot 10^{-5}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	1,21	1,21	0,008
110	1,29	1,29	0,008
120	1,32	1,32	0,008
130	1,35	1,35	0,015
140	1,41	1,41	0,014
150	1,43	1,43	0,021
160	1,48	1,48	0,020
170	1,50	1,50	0,020
180	1,53	1,53	0,026
190	1,56	1,56	0,026
200	1,58	1,58	0,025
210	1,59	1,59	0,025
220	1,61	1,61	0,031

Tabuľka A.1: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky pri tlaku $5,4 \cdot 10^{-5}$ Pa. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,04	1,99	0,020
110	0,05	2,10	0,024
120	0,05	2,21	0,023
130	0,05	2,25	0,022
140	0,07	2,30	0,030
150	0,08	2,41	0,033
160	0,09	2,50	0,036
170	0,10	2,56	0,039
180	0,11	2,62	0,042
190	0,12	2,67	0,045
200	0,13	2,72	0,048
210	0,14	2,76	0,051
220	0,15	2,82	0,053

Tabuľka A.2: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky pri tlaku $1,1 \cdot 10^{-4}$ Pa. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 6,2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,12	1,31	0,092
110	0,15	1,39	0,108
120	0,18	1,44	0,125
130	0,21	1,49	0,141
140	0,25	1,54	0,162
150	0,28	1,58	0,177
160	0,31	1,60	0,194
170	0,34	1,64	0,207
180	0,36	1,67	0,216
190	0,38	1,70	0,224
200	0,40	1,70	0,235
210	0,42	1,72	0,244
220	0,43	1,74	0,247

Tabuľka A.3: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpäti mriežky pri tlaku $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,15	0,91	0,165
110	0,19	0,97	0,196
120	0,23	0,99	0,232
130	0,27	1,04	0,260
140	0,31	1,08	0,287
150	0,36	1,10	0,327
160	0,41	1,13	0,363
170	0,44	1,15	0,383
180	0,47	1,17	0,402
190	0,49	1,18	0,415
200	0,51	1,19	0,429
210	0,53	1,21	0,438
220	0,55	1,22	0,451

Tabuľka A.4: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpäti mriežky pri tlaku $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 5,6 \cdot 10^{-3}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,30	0,36	0,83
110	0,37	0,37	1,00
120	0,44	0,38	1,16
130	0,51	0,40	1,28
140	0,58	0,41	1,41
150	0,65	0,42	1,55
160	0,73	0,42	1,74
170	0,78	0,43	1,81
180	0,81	0,43	1,88
190	0,85	0,43	1,98
200	0,88	0,44	2,00
210	0,92	0,45	2,04
220	0,94	0,45	2,09

Tabuľka A.5: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky pri tlaku $5,6 \cdot 10^{-3}$ Pa. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,40	0,28	1,43
110	0,49	0,28	1,75
120	0,57	0,27	2,11
130	0,67	0,29	2,31
140	0,75	0,29	2,59
150	0,85	0,30	2,83
160	0,94	0,31	3,03
170	1,00	0,31	3,23
180	1,05	0,31	3,39
190	1,10	0,30	3,67
200	1,14	0,32	3,56
210	1,18	0,31	3,81
220	1,21	0,32	3,78

Tabuľka A.6: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky napäťia pri tlaku $1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd 2,7A.

$p = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
100	0,05	2,95	0,017
110	0,07	3,4	0,021
120	0,09	3,73	0,024
130	0,12	4,03	0,030
140	0,14	4,28	0,033
150	0,17	4,54	0,037
160	0,2	4,46	0,045
170	0,23	4,41	0,052
180	0,25	4,38	0,057
190	0,26	4,35	0,060
200	0,3	4,31	0,070
210	0,33	4,27	0,077
220	0,36	4,24	0,085

Tabuľka A.7: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote predpätí mriežky pri tlaku $5,5 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. Predpätie katódy v tomto prípade bolo 30V, žhaviaci prúd bol zmenený na 2,8A aby sa zvýšil elektrónový a iontový prúd a tým pádom aj presnosť.

Dodatok B

Tabuľky s nameranými a
vyrátanými hodnotami závislostí
na žhaviacom prúde a tlaku.

$p = 4,8 \cdot 10^{-5}$ Pa				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,07	0,0
2,4	2,1	0,00	0,07	0,0
2,6	2,2	0,00	0,07	0,0
2,9	2,3	0,00	0,12	0,00
3,1	2,4	0,00	0,24	0,00
3,3	2,5	0,01	0,66	0,01
3,5	2,6	0,02	1,52	0,013
3,8	2,7	0,05	2,94	0,017
4,0	2,8	0,10	4,25	0,023
4,3	2,9	0,28	2,85	0,098

Tabuľka B.1: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $4,8 \cdot 10^{-5}$ Pa. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

$p = 1,1 \cdot 10^{-4}$ Pa				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,07	0,0
2,4	2,1	0,00	0,10	0,00
2,6	2,2	0,00	0,10	0,00
2,9	2,3	0,00	0,11	0,00
3,1	2,4	0,01	0,19	0,05
3,3	2,5	0,01	0,52	0,02
3,5	2,6	0,05	1,27	0,039
3,8	2,7	0,11	2,55	0,043
4,0	2,8	0,19	4,44	0,043
4,3	2,9	0,29	3,06	0,095

Tabuľka B.2: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $1,1 \cdot 10^{-4}$ Pa. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

$p = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,08	0,00
2,4	2,1	0,00	0,07	0,00
2,6	2,2	0,00	0,08	0,00
2,9	2,3	0,00	0,09	0,00
3,1	2,4	0,01	0,11	0,09
3,3	2,5	0,04	0,19	0,21
3,5	2,6	0,12	0,57	0,21
3,8	2,7	0,35	1,62	0,216
4,0	2,8	0,71	3,42	0,208
4,3	2,9	1,18	3,44	0,343

Tabuľka B.3: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $5,9 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

$p = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,08	0,00
2,4	2,1	0,00	0,09	0,00
2,6	2,2	0,00	0,08	0,00
2,9	2,3	0,00	0,10	0,00
3,1	2,4	0,01	0,11	0,09
3,3	2,5	0,04	0,15	0,27
3,5	2,6	0,16	0,44	0,36
3,8	2,7	0,48	1,25	0,384
4,0	2,8	1,07	2,92	0,366
4,3	2,9	1,90	3,83	0,496

Tabuľka B.4: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

$p = 5,1 \cdot 10^{-3}$ Pa				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,08	0,00
2,4	2,1	0,00	0,08	0,00
2,6	2,2	0,00	0,08	0,00
2,9	2,3	0,01	0,09	0,11
3,1	2,4	0,03	0,09	0,33
3,3	2,5	0,09	0,12	0,75
3,5	2,6	0,28	0,19	1,47
3,8	2,7	0,77	0,46	1,67
4,0	2,8	2,02	1,20	1,68
4,3	2,9	4,73	3,03	1,561

Tabuľka B.5: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $5,1 \cdot 10^{-3}$ Pa. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

$p = 9,8 \cdot 10^{-3}$ Pa				
Zdroj [V]	Zdroj [A]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,2	2,0	0,00	0,07	0,0
2,4	2,1	0,00	0,09	0,00
2,6	2,2	0,00	0,08	0,00
2,9	2,3	0,01	0,09	0,11
3,1	2,4	0,04	0,09	0,44
3,3	2,5	0,13	0,10	1,3
3,5	2,6	0,40	0,15	2,7
3,8	2,7	1,00	0,31	3,23
4,0	2,8	2,66	0,81	3,28
4,3	2,9	4,50	1,45	3,10

Tabuľka B.6: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na hodnote žhaviaceho napäťia a prúde pri tlaku $9,8 \cdot 10^{-3}$ Pa. Predpätie katódy bolo 30V, predpätie mriežky 180V.

Dodatok C

Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami závislostí na predpätí katódy a tlaku.

p = $5,3 \cdot 10^{-5}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
0	0,00	3,17	0,000
15	0,08	3,05	0,026
20	0,08	3,00	0,027
25	0,07	2,94	0,024
30	0,06	2,88	0,021
35	0,05	2,82	0,018
40	0,05	2,75	0,018

Tabuľka C.1: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $5,3 \cdot 10^{-5}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

p = $1,3 \cdot 10^{-4}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
15	0,15	2,71	0,055
20	0,14	2,67	0,052
25	0,13	2,62	0,050
30	0,12	2,55	0,047
35	0,10	2,49	0,040
40	0,09	2,42	0,037

Tabuľka C.2: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $1,3 \cdot 10^{-4}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

p = $5,5 \cdot 10^{-4}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
8,9	0,46	1,80	0,256
15	0,40	1,77	0,226
20	0,37	1,75	0,211
25	0,34	1,71	0,199
30	0,32	1,67	0,192
35	0,29	1,63	0,178
40	0,26	1,59	0,164

Tabuľka C.3: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $5,5 \cdot 10^{-4}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

p = $1,1 \cdot 10^{-3}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
6,2	0,69	1,25	0,552
15	0,57	1,22	0,467
20	0,52	1,22	0,426
25	0,48	1,20	0,400
30	0,46	1,17	0,393
35	0,41	1,14	0,360
40	0,36	1,11	0,324

Tabuľka C.4: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $1,1 \cdot 10^{-3}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

p = $5,4 \cdot 10^{-3}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
2,4	1,34	0,48	2,79
15	1,02	0,47	2,17
20	0,92	0,46	2,00
25	0,87	0,46	1,89
30	0,82	0,46	1,78
35	0,75	0,44	1,70
40	0,66	0,44	1,50

Tabuľka C.5: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $5,4 \cdot 10^{-3}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

p = $1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa			
Zdroj [V]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
1,7	1,74	0,34	5,1
15	1,32	0,34	3,88
20	1,19	0,33	3,61
25	1,12	0,33	3,39
30	1,05	0,33	3,18
35	0,96	0,33	2,91
40	0,85	0,32	2,66

Tabuľka C.6: Závislosť nameraných parametrov U_i a U_e a ich podielu U_i/U_e na predpätí katódy pri tlaku $1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa. Žhaviaci prúd bol 2,7A, predpätie mriežky 180V.

Dodatok D

Tabuľky s nameranými a vyrátanými hodnotami pre kalibráciu.

p [Pa]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
$5,8 \cdot 10^{-5}$	0,07	2,81	0,025
$1,4 \cdot 10^{-4}$	0,13	2,47	0,053
$2,7 \cdot 10^{-4}$	0,21	2,13	0,099
$5,5 \cdot 10^{-4}$	0,31	1,67	0,186
$7,7 \cdot 10^{-4}$	0,37	1,43	0,259
$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,43	1,22	0,352
$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,58	0,78	0,74
$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,69	0,56	1,23
$5,5 \cdot 10^{-3}$	0,80	0,44	1,82
$6,9 \cdot 10^{-3}$	0,88	0,39	2,26
$8,6 \cdot 10^{-3}$	0,96	0,36	2,67
$1,0 \cdot 10^{-2}$	1,03	0,33	3,12

Tabuľka D.1: Namerané závislosti iontového a elektrónového napäťia na tlaku pri doporučených parametroch, spolu s fitovacou krivkou.

p [Pa]	U_i [V]	U_e [V]	U_i/U_e [-]
$2,4 \cdot 10^{-5}$	0,04	3,00	0,013
$3,7 \cdot 10^{-5}$	0,05	2,98	0,017
$6,0 \cdot 10^{-5}$	0,07	2,97	0,024
$7,9 \cdot 10^{-5}$	0,09	3,05	0,030
$1,0 \cdot 10^{-4}$	0,11	3,03	0,036
$2,5 \cdot 10^{-4}$	0,26	2,98	0,087
$4,5 \cdot 10^{-4}$	0,44	2,90	0,152
$6,0 \cdot 10^{-4}$	0,57	2,85	0,200
$8,0 \cdot 10^{-4}$	0,73	2,80	0,261
$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,89	2,74	0,325
$2,4 \cdot 10^{-3}$	1,79	2,48	0,722
$4,2 \cdot 10^{-3}$	2,75	2,18	1,261
$6,3 \cdot 10^{-3}$	3,67	1,92	1,911
$7,8 \cdot 10^{-3}$	4,23	1,78	2,38
$1,0 \cdot 10^{-2}$	4,59	1,7	2,70

Tabuľka D.2: Namerané závislosti iontového a elektrónového napäťia na tlaku pri doporučených parametroch a napúšťanom héliu.

Dodatok E

Program ktorým bolo riadené arduino.

```
const int numReadings = 100;
const int numReadings2 = 100;
float readings[numReadings];
float readings2[numReadings2];
int readIndex = 0;
int readIndex2 = 0;
float total = 0.0;
float total2 = 0.0;
float average = 0.0;
float average2 = 0.0;

void setup() {
Serial.begin(9600);
for (int thisReading = 0; thisReading < numReadings; thisReading++) {
readings[thisReading] = 0;
}
for (int thisReading2 = 0; thisReading2 < numReadings2; thisReading2++) {
readings2[thisReading2] = 0;
}
}

void loop() {
total = total - readings[readIndex];
int sensorValue = analogRead(A0);
float voltage = sensorValue * (5 / 1023.0);
readings[readIndex] = voltage;
total = total + readings[readIndex];
readIndex = readIndex + 1;
```

```
if (readIndex >= numReadings) {  
    readIndex = 0;  
}  
average = total / numReadings;  
  
total2 = total2 - readings2[readIndex2];  
int sensorValue2 = analogRead(A1);  
float voltage2 = sensorValue2 * (5 / 1023.0);  
readings2[readIndex2] = voltage2;  
total2 = total2 + readings2[readIndex2];  
readIndex2 = readIndex2 + 1;  
if (readIndex2 >= numReadings2) {  
    readIndex2 = 0;  
}  
average2 = total2 / numReadings2;  
Serial.print(average);  
Serial.print(";" );  
Serial.println(average2);  
delay(1);  
}
```