

Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

# BAKALÁRSKA PRÁCA



Anna Kolpaková

## Diagnostika výboja v magnetrone Langmuirovou sondou

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Pavel Kudrna, Dr.

Študijný program: Fyzika, obecná fyzika

2007

Rada by som na tomto mieste poďakovala predovšetkým svojmu vedúcemu Mgr. Pavlovi Kudrnovi, Dr. za jeho ochotu, podnetné rady a pripomienky k mojej práci a za odbornú pomoc pri jej spracovávaní. Ďalej by som chcela poďakovať rodičom za ich podporu.

Prehlasujem, že som svoju bakalársku prácu napísala samostatne a výhradne s použitím citovaných prameňov. Súhlasím s požičiavaním práce a jej zverejňovaním.

V Prahe dňa 6. augusta 2007

Anna Kolpaková

# Obsah

<b>Abstrakt</b> .....	4
<b>Použité symboly</b> .....	5
<b>1. Úvod</b> .....	6
<b>2. Plazma</b> .....	7
2.1 Výskyt plazmy .....	7
2.2 Definícia plazmy .....	7
2.3 Vlastnosti plazmy .....	10
<b>3. Diagnostika plazmy</b> .....	11
3.1 Langmuirova sonda .....	11
3.2 Sondová charakteristika .....	12
3.3 Režimy sondovej diagnostiky .....	14
<b>4. Cieľ práce</b> .....	15
<b>5. Experimentálna časť</b> .....	16
5.1 Elektronika pre sondové merania .....	16
5.1.1 Izolovaný zdroj .....	19
5.1.2 Merací modul U2351A .....	20
5.2 Tvorba softwaru pomocou Agilent Vee pro 7.5 .....	21
5.2.1 Základy práce s Vee .....	21
5.2.2 Program na sondové merania .....	24
5.2.3 Program na meranie vybíjania zdroja .....	25
5.3 Meranie charakteristík zdroja .....	25
5.3.1 Vyhodnotenie nameraných výsledkov .....	28
5.3.2 Diskusia .....	29
<b>7. Záver</b> .....	31
<b>8. Literatúra</b> .....	32

# Abstrakt

Názov práce: Diagnostika výboja v magnetrone Langmuirovou sondou

Autor: Anna Kolpaková

Katedra (ústav): Katedra fyziky povrchov a plazmy

Vedúci bakalárskej práce: Mgr. Pavel Kudrna, Dr.

e-mail vedúceho: Pavel.Kudrna@mff.cuni.cz

Abstrakt: Táto práca sa zaoberá diagnostikou plazmy s pomocou Langmuirovej sondy so zameraním hlavne na jednosondovú metódu. V experimentálnej časti práce je uvedený popis sondového obvodu, izolovaného zdroja a meracieho modulu U2351A. Na to nadväzuje popis softwaru pre zber a spracovanie dát zo sondových meraní, vytvorený pomocou ikonického jazyka Agilent Vee. Cieľom práce bolo premeranie vlastností galvanicky oddeleného zdroja napätia a overenie jeho využitia pri sondovom meraní. Namerané výsledky sú zhrnuté v grafoch.

Kľúčové slová: Langmuirova sonda, galvanicky oddelený zdroj, Agilent Vee

Title: Langmuir probe diagnostics of the magnetron discharge

Author: Anna Kolpaková

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: Mgr. Pavel Kudrna, Dr.

Supervisor's e-mail: Pavel.Kudrna@mff.cuni.cz

Abstract: This thesis is focused on plasma diagnostics using Langmuir probe especially the single probe method. The experimental part shows description of the probe circuit, the isolated power supply and the USB data acquisition module U2351A. We present software created for Langmuir probe measurements by means of the iconic programming language Agilent Vee. Aim of the bachelor work was to measure the discharging characteristics of the isolated DC power supply and to validate its function during the Langmuir probe measurement. Results are plotted in graphs and discussed.

Keywords: Langmuir probe, isolated power supply, Agilent Vee

# Použité symboly

$\lambda_D$  – Debyeova dĺžka

$T_e$  – teplota elektrónov

$n_e$  – koncentrácia elektrónov

$n_i$  – koncentrácia iontov

$n$  – koncentrácia častíc

$\tau$  – parameter neizotermičnosti plazmy

$k$  – Boltzmannova konštanta ( $= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1} = 8,6171 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ )

$e$  – náboj elektrónu ( $= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

$\epsilon_0$  – permitivita vákua ( $= 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ )

$V_{pl}$  – potenciál plazmy

$V_{fl}$  – plávajúci potenciál

$r_p$  – polomer sondy

# Kapitola 1

## Úvod

Na prelome 19. a 20. storočia má korene výskum i následné vyžitie plazmy. Významného pokroku sa dočkala diagnostika plazmy až v 20. rokoch 20. storočia vďaka štúdiám pánov Langmuira, Tonksa a ich kolegov. Podnetom ich výskumu bola potreba vyvinúť trubice, ktoré by pri nízkom tlaku mohli viesť veľké prúdy. Museli byť naplnené ionizovaným plynom. Langmuir vo svojich prácach popísal 2 základne druhy sond – sondy emisné a taktiež sondy merajúce prúd častíc, ktoré dopadajú na ich povrch (Langmuirova sonda). V roku 1932 bola Irvingovi Langmuirovi za jeho práce udelená Nobelova cena za chémiu.

Dnes má plazma široké využitie v rôznych odvetviach priemyslu, napríklad pri nanášaní tenkých vrstiev alebo pri výrobe integrovaných obvodov plazmatickým leptaním.

Predkladaná bakalárska práca je členená na niekoľko častí. Predmetom prvej časti je úvod do problematiky sondovej diagnostiky plazmy. V ďalšej časti sú zhrnuté ciele práce. V experimentálnej časti je popísaná sondová elektronika prevzatá vo funkčnom stave, u ktorej som sa zamerala na možnosť nahradenia akumulátorov izolovaným zdrojom. Do tejto kapitoly patrí aj program na sondové merania, namerané výsledky, ktoré sú zhrnuté do grafov a ich diskusia.

Táto práca prispela k zjednodušeniu a uľahčeniu merania sondovej charakteristiky.

# Kapitola 2

## Plazma

### 2.1 Výskyt plazmy

Plazma je najrozšírenejšia forma látky. Vo vesmíre sa 99% známej hmoty vyskytuje v plazmatickom stave. Väčšina medzihviezdného vodíka, plynnej hmloviny ako aj vnútra a atmosféry hviezd sú tvorené plazmou. Napriek tomu, že má plazma vo vesmíre takéto veľké rozšírenie, na Zemi s ňou už tak často do styku neprichádzame. V bežnom živote sa stretávame s plazmou ako súčasťou plazmových obrazoviek a displejov, žiaroviek, neónových svetelných reklám. Plazma oblúkového výboja sa používa pri zváraní kovových materiálov. Príkladom prírodnej plazmy, ktorú môžeme pozorovať, je elektrický výboj blesku a polárna žiara.

### 2.2 Definícia plazmy

Často môžeme počuť, že sa o plazme hovorí ako o štvrtom skupenstve hmoty. Zvyšovaním teploty sa totiž pevná látka mení na kvapalinu, ktorá sa mení na plyn. Pri ďalšom zvyšovaní teploty už dochádza k tepelnej ionizácii plynu. Ionizovaný plyn sa potom označuje termínom plazma. Plazma je teda súbor elektrónov, iontov a neutrálnych častíc v rôznych energetických stavoch, ktoré spolu navzájom interagujú. Musia byť splnené ale určité kritéria. Aby sme mohli ionizovaný plyn považovať za plazmu musí spĺňať požiadavky na *kvazineutralitu* a *kolektívne správanie*.

Nabité častice pri svojom pohybe môžu vytvárať lokálne koncentrácie kladného alebo záporného náboja, ktoré silovo pôsobia na pohyb iných nabitých častíc na vzdialenom mieste. V tejto interakcii vystupuje Coulombova sila, ktorá klesá so vzdialenosťou ako  $1/r^2$ . Objem plazmy, ktorý pôsobí na nabitú časticu v danom priestorovom uhle, rastie ako  $r^3$ . Z toho vyplýva, že časti plazmy môžu na seba pôsobiť aj na veľké vzdialenosti. *Kolektívnym správaním* rozumieme pohyby častice, ktoré nebudú závislé len na lokálnych podmienkach v jej okolí, ale aj na stave plazmy vo vzdialenejších oblastiach.

Ako celok je plazma elektricky neutrálna. To však nemusí platiť lokálne. Túto vlastnosť nazývame *kvázineutralita* plazmy. *Kvázineutralita* označuje približnú rovnosť koncentrácií kladne a záporne nabitých častíc v dostatočne veľkej oblasti plazmy (vo vzdialenosti väčšej ako je Debyeova dĺžka).

S kvázineutralitou súvisí schopnosť plazmy odtieniť elektrické pole lokálnou zmenou koncentrácie nabitých častíc. Ak by sme vložili do plazmy vodič s iným potenciálom, než je potenciál v danom mieste plazmy, obklopiť vodič častice s nábojom opačnej polariny než je náboj vodiča. Za predpokladu dostatočnej koncentrácie plazmy tým dôjde k odtieneniu priloženého potenciálu vo vzdialenosti krátkej v porovnaní s rozmermi systému. Zvyšok plazmy zostane potenciálom neovplyvnený. Pole potom so vzdialenosťou od vodiča klesá približne exponenciálne. Hrúbka vrstvy priestorového náboja, ktorá vložený vodič obklopuje, je popísaná tzv. Debyeovou dĺžkou  $\lambda_D$  (príklad odvedenia viď [1, 2]):

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e}} \quad (1)$$

kde  $n_e$  je koncentrácia a  $T_e$  teplota elektrónov. Vo vzdialenosti označovanej ako Debyeova dĺžka je plazma už opäť kvázineutrálna.



## 2.3 Vlastnosti plazmy

Už bolo povedané, že za plazmu považujeme ionizovaný plyn. Stupeň ionizácie plazmy je daný pomerom koncentrácie ionizovaných častíc k celkovému počtu častíc [1]:

$$\chi = \frac{n_i}{n} = \frac{n_i}{n_n + n_e} \quad (2)$$

Ak je koncentrácia nabitých častíc zanedbateľne malá v porovnaní s koncentráciou neutrálnych molekúl, považujeme plazmu za slabo ionizovanú. Ako príklad môžeme uviesť tlejivý výboj. V prípade, že prevláda koncentrácia nabitých častíc, tak hovoríme o silne ionizovanej plazme. V bežnom živote sa stretávame so slabo ionizovanou plazmou.

Plazmou sa môžeme zaoberať aj z hľadiska teploty. Pri určovaní teploty plynu sa predpokladá, že sa plyn nachádza v úplnej termodynamickej rovnováhe. V reálnej plazme sa ale prakticky vždy vyskytujú odchýlky od termodynamickej rovnováhy. Ak sú tieto odchýlky malé a obmedzujú sa len na niektoré procesy, popisujeme stav plazmy ako blízky rovnováhe. Lokálna termodynamická rovnováha LTE je najdôležitejší model, ktorý popisuje plazmu blízko rovnováhy. Tento model predpokladá platnosť všetkých vlastností úplnej termodynamickej rovnováhy okrem splnenia Planckovho vyžarovacieho zákona. Ak sú odchýlky výraznejšie, môžeme popísať každý druh častíc vlastnou kinetickou teplotou. V plazme na rozdiel od bežného plynu sa môže teplota elektrónov značne líšiť od teploty iontov a neutrálnych častíc. Takúto plazmu nazývame neizotermická. Neizotropičnosť popisuje tzv. anizotropný parameter  $\tau$ :

$$\tau = \frac{T_e}{T_i} \quad (3)$$

Podľa teploty môžeme plazmu ešte rozdeliť na nízkoteplotnú (blesk, výbojky, laboratórna plazma) a vysokoteplotnú (vnútro Slnka, hviezdy).

Ďalšou z vlastností plazmy je vodivosť. Plazma v porovnaní s plynom obsahuje voľné elektrické náboje, preto je elektricky vodivá. Charakter elektrickej vodivosti závisí na stupni ionizácie plazmy. Vodivosť slabo ionizovanej plazmy narastá s koncentráciou nabitých častíc, ak je koncentrácia konštantná, vodivosť klesá s rastúcou teplotou elektrónov. V prípade silne ionizovanej plazmy vodivosť narastá s teplotou elektrónov s exponentom  $3/2$ , nie je ovplyvnená koncentráciou nabitých častíc [2].

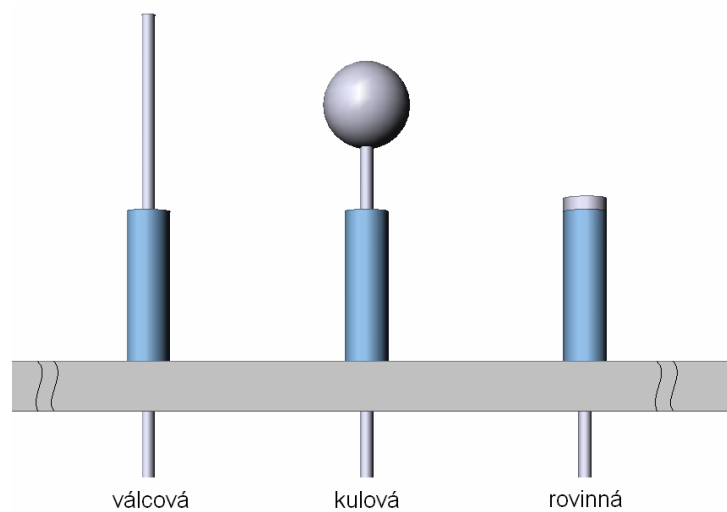
# Kapitola 3

## Diagnostika plazmy

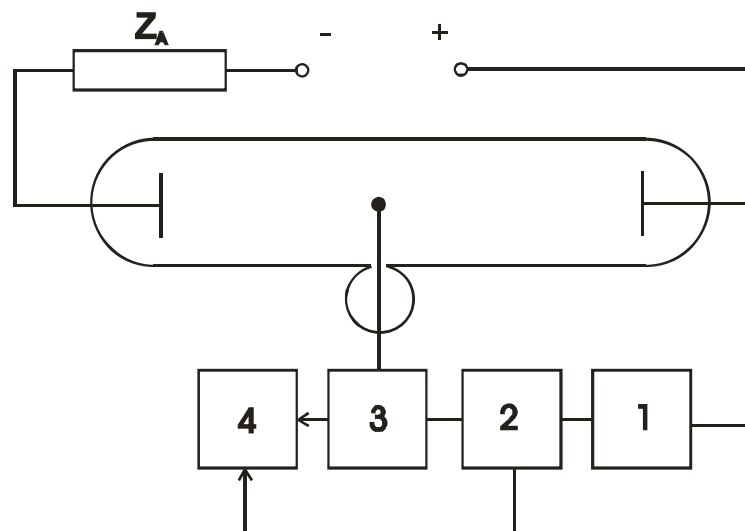
Diagnostika plazmy je rozsiahla skupina experimentálnych metód na určovanie parametrov plazmy. Predstavuje samostatný odbor vo fyzike, ktorý má vlastné metódy i teóriu. Metódy obvykle rozdeľujeme na aktívne (kontaktné) a pasívne (bezkontaktné). Kontaktné metódy sú také, pri ktorých do plazmy niečo vkladáme alebo na plazmu pôsobíme. Príkladom aktívnej metódy je absorpčná spektroskopia alebo sondy. K pasívnym metódam patrí emisná alebo hmotová spektroskopia. Ďalej sa ešte používajú optické metódy, ktoré fungujú v aktívnej podobe, keď plazmu zvonka ožarujeme a pozorujeme interakcie, ale aj v pasívnej forme, ktorá spočíva v analýze a vyhodnotení spektra detekovaného z plazmy. Jednou z často používaných metód skúmania parametrov plazmy je sondová metóda.

### 3.1 Langmuirova sonda

Langmuirova sonda je kovová elektróda, tvorená veľmi tenkým vodivým drôtom z vysoko odolného materiálu (W, Pt), umiestnená do plazmy. Poznáme sondy rôznych tvarov. V praxi sa najčastejšie používajú 3 typy: rovinná, valcová (cylindrická) a guľová (sférická), znázornené na obrázku 1. Potenciál sondy možno meniť zapojením do elektrického obvodu. Typické usporiadanie sondového obvodu vidíme na obrázku 2. Na vytvorenie uzavretého obvodu potrebujeme v plazme ešte ďalšiu tzv. referenčnú elektródu. Ak je plocha referenčnej elektródy značne väčšia než plocha sondy hovoríme o jednosondovej metóde. V prípade, že majú obe sondy porovnateľný povrch, takéto usporiadanie nazývame dvojsondová metóda.



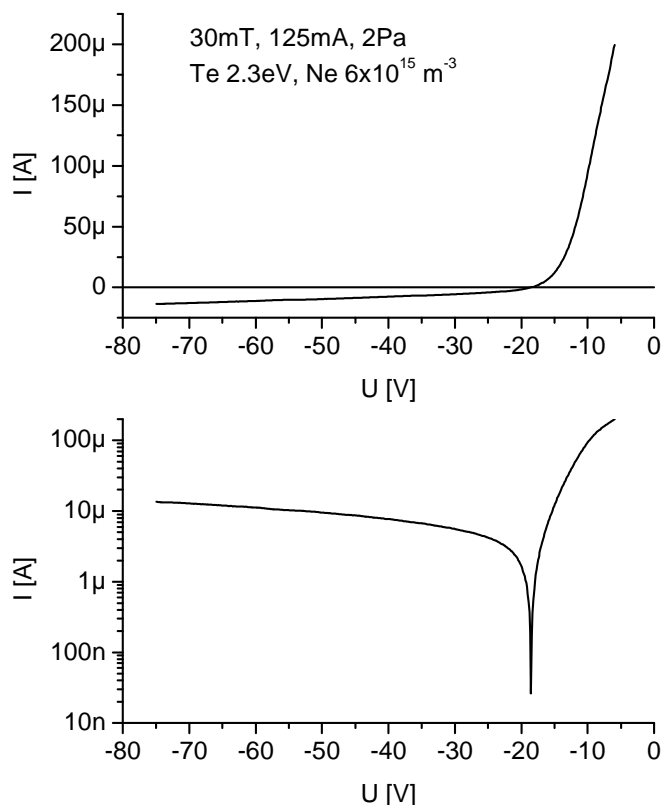
Obr. 1: Hlavné 3 typy v praxi používaných sond. Prevzaté z [3].



Obr. 2: Charakteristická schéma sondového obvodu: 1 – jednosmerné predpätie, 2 – laditeľný zdroj napätia, 3 – prevodník prúd-napätie, 4 – zber dát. Prevzaté z [4].

### 3.1 Sondová charakteristika

Meranie parametrov plazmy metódou jednej sondy spočíva v tom, že meníme napätie sondy k referenčnej elektróde. Tým sa posúva potenciál sondy vzhľadom k potenciálu plazmy a dôjde k zmene prúdu častíc tečúcich na sondu. Meraním sondového prúdu v závislosti na napätí získame voltampérovú charakteristiku, ktorú nazývame *sondová charakteristika*. Príklad takejto sondovej charakteristiky je na obrázku 3.



Obr. 3: Príklad sondovej charakteristiky nameranej vo valcovom magnetrone.

Na sondovej charakteristike sa vyskytujú dva význačné body, ktoré ju delia na tri časti. Ak zmenou napätia nastavíme na sonde nulový prúd, sonda sa nachádza na plávajúcom potenciáli  $V_{fl}$ . Je to potenciál, na ktorý sa nabije izolované teleso, vložené do plazmy. Druhým bodom je potenciál plazmy  $V_{pl}$ . Sonda má potenciál plazmy, ak na ňu dopadajú častice iba vplyvom chaotického tepelného pohybu.

Sondovú charakteristiku možno rozdeliť podľa typu častíc dopadajúcich na sondu na tri oblasti:

1. *nasýtený iontový prúd*: Napätie na sonde je dostatočne záporné vzhľadom k plazme. Častice so záporným nábojom sú odpudzované a nemôžu dopadnúť na sondu. Okolo sondy vzniká vrstva kladného priestorového náboja, ktorá odtieňuje potenciál sondy. Kladné častice sú priťahované a vytvárajú sondový prúd. Zvyšovaním napätia na sonde bude efekt priťahovania kladných iontov slabnúť a iontový prúd bude klesať. Na konci tejto oblasti budú mať rýchle

elektróny dostatočne vysokú energiu, aby mohli na sondu dopadnúť. Elektronový prúd rastie a pri istom napätí sa bude rovnať prúdu kladných iónov. Tento bod je plávajúci potenciál.

2. *prechodová oblasť*: Ďalším zvyšovaním napätia prúd elektrónov prudko rastie. Vplyv iónov ešte nemôžeme zanedbať, pretože sú stále priťahované záporným potenciálom. Keď priložíme na sondu rovnaké napätie ako je potenciál plazmy, vrstva priestorového napätia okolo sondy zmizne. Prúd na sonde bude spôsobený iba tepelným chaotickým pohybom častíc.
3. *nasýtený elektronový prúd*: Ak je na sonde vyššie napätie ako potenciál plazmy, kladné ióny nemôžu na sondu prenikať a prúd je tvorený hlavne elektrónmi.

## 3.2 Režimy sondovej diagnostiky

Vrstva priestorového náboja, ktorá vznikla okolo sondy, je popisovaná parametrom  $\lambda_D$ . Pracovné režimy sondy môžeme rozdeliť na dva prípady podľa relatívnej veľkosti vrstvy vzhľadom k rozmerom sondy:

1. space charge limit – hrúbka tieniacej vrstvy je menšia než polomer sondy. Sondový prúd bude daný priestorovým nábojom okolo sondy.

$$r_p \gg \lambda_D$$

2. orbit motion limit (OML) – hrúbka tieniacej vrstvy je väčšia než polomer sondy. Častice vnútri sondy sú ovplyvňované centrálnou silou, ich pohyb je podobný orbitálnemu.

$$r_p \ll \lambda_D$$

kde  $r_p$  je polomer sondy.

Prakticky sa veľkosť sondy volí v oblasti OML, kde je možné určovať zo sondovej charakteristiky nielen teplotu elektrónov, ale aj koncentráciu plazmy.

# Kapitola 4

## Ciel' práce

Predmetom teoretickej časti bakalárskej práce bolo štúdium literatúry týkajúcej sa problematiky sondových meraní a diagnostiky plazmy.

Cieľom praktickej časti práce bola tvorba softwaru pre USB merací modul Agilent U2351A, pomocou ktorého môžeme generovať napätie a merať prúd zo sondového obvodu (vďaka zabudovanému D/A prevodníku).

Ďalšou úlohou bolo premeranie vlastností galvanicky oddeleného zdroja napätia s DC/DC konvertormi a kondenzátormi s veľkou kapacitou z hľadiska jeho vhodnosti pre sondové merania. Tento zdroj by mohol nahradiť v súčasnosti používané napájanie sondového obvodu z NiCd a NiMH akumulátorov.

# Kapitola 5

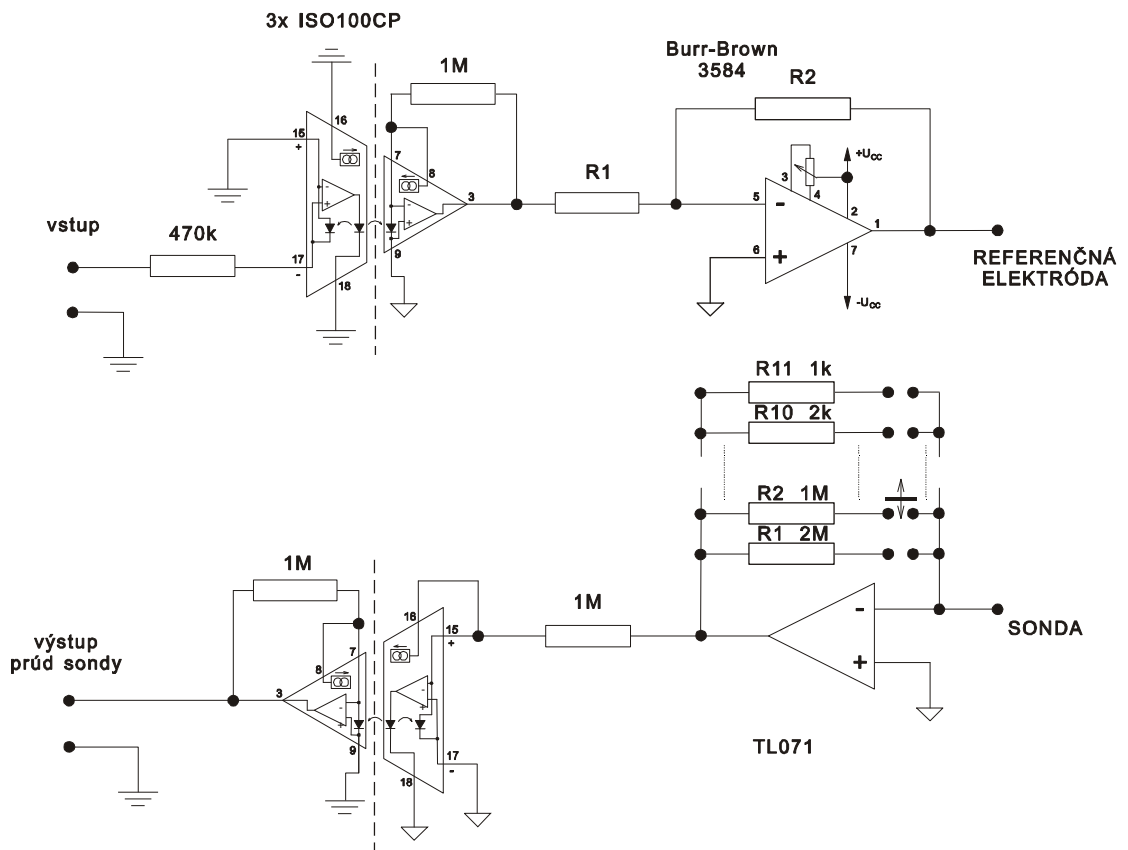
## Experimentálna časť

### 5.1 Elektronika pre sondové merania

Pri meraní sondových charakteristík je potrebné nastavovať napätie na sonde vzhľadom k referenčnej elektróde. V závislosti na typu plazmy môže byť napäťový rozsah charakteristiky niekoľko desiatok voltov. Používa sa preto prispôsobovacia elektronika, ktorá zosilňuje nízke napätie generované meracími kartami, spravidla 0 – 10 V zhruba 10 krát. Súčasne je potrebné previesť sondový prúd na napätie opäť v rozsahu vhodnom pre meraciu kartu, typicky -10 – 10 V. Z dôvodu jednak nižšieho rušenia pri vlastnom meraní a tiež pre ľahšie použitie sondového obvodu je veľmi výhodné, keď je tento obvod galvanicky oddelený od zeme meracej karty, ktorá býva zároveň aj zemou riadiaceho počítača.

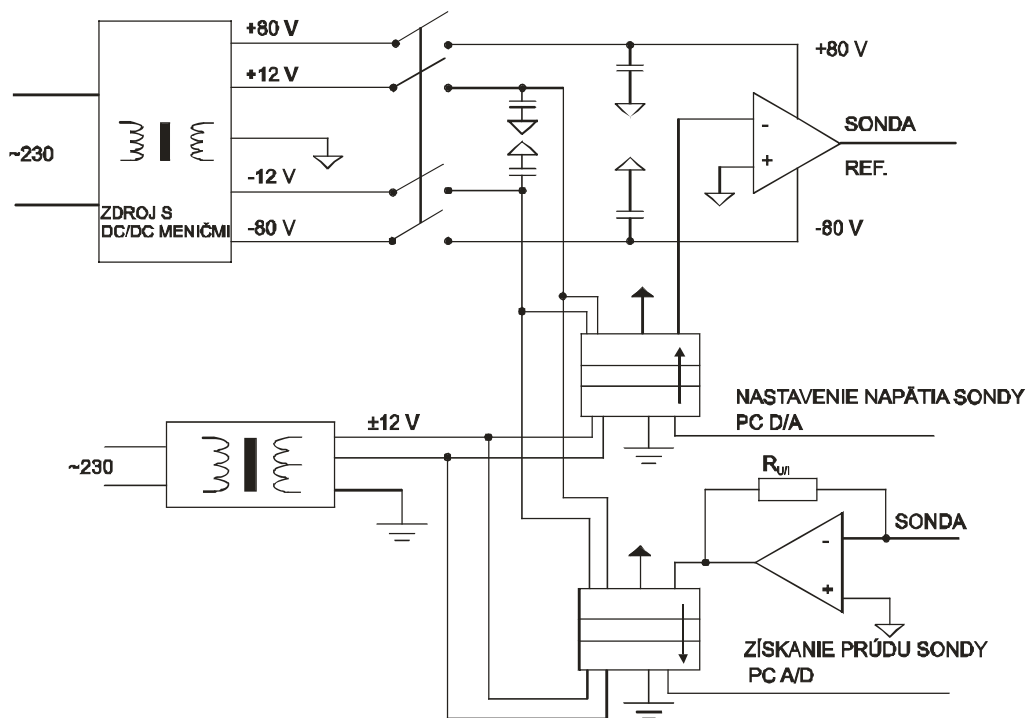
K dispozícii bol už hotový sondový obvod, ktorého schéma je nakreslená na obrázku 4. Horná časť obvodu slúži pre nastavovanie sondového napätia. Galvanické oddelenie zaisťuje izolačný zosilňovač ISO100CP. Zosilnenie napätia je realizované vysokonapäťovým operačným zosilňovačom Burr–Brown 3584. Dolná časť zapojenia prevádza sondový prúd na napätie. To sa realizuje operačným zosilňovačom v zapojení ako prevodník prúd–napätie. Rozsahy prevodníka môžeme meniť prepínaním rezistorov v spätnej väzbe. Napätie úmerné sondovému prúdu je opäť oddelené izolačným zosilňovačom.





Obr. 4: Detailná schéma sondového obvodu. Izolačná bariéra je vyznačená prerušovanou čiarou.

Pre napájanie sondového obvodu je jednak potrebné bežné symetrické napätie,  $\pm 12\text{ V}$  pre napájanie časti izolačných zosilňovačov spojenej s meracou kartou, poprípade počítačom a potom dve galvanicky oddelené symetrické napätia. Prvé napätie opäť  $\pm 12\text{ V}$  pre plávajúcu časť izolačných zosilňovačov a prevodník prúd - napätie a druhé napätie cca  $\pm 80\text{ V}$  pre vysokonapäťový operačný zosilňovač. Obidva zdroje a ich pripojenie k sondovému obvodu je vyznačené na obrázku 5.



Obr. 5: Pripojenie napájacích zdrojov k sondovému obvodu.

### 5.1.1 Izolovaný zdroj

Zdroj jednosmerného napätia s plávajúcou zemou s rozsahom  $\pm 80$  V a  $\pm 12$  V bol vyrobený študentmi ako úloha špeciálneho praktika EVF. Hlavnou časťou zdroja sú DC/DC meniče DCP020515DP [5]. Ide o hybridné izolované meniče, riadené integrovaným obvodom, so vstupným napätím 5 V a nestabilizovaným výstupným napätím  $\pm 15$  V o výkone 2 W. Pre prenos energie využívajú toroidálny transformátor, ktorý pracuje na frekvencií 400 kHz. Oscilátor môže byť synchronizovaný s inými DCP02 obvodmi alebo vonkajšími zdrojmi čo je možné použiť na minimalizáciu šumu.

V zdroji je napätie  $\pm 80$  V vytvárané meničmi v sérii. Ich výstupný prúd nabíja batériu veľkokapacitných kondenzátorov. Napätie v  $\pm 12$  V vetve je tvorené meničom priamo. Zeme oboch vetví sú spojené. Napájanie meničov zaisťuje sieťový transformátor.

Rušivé napätie so základnou frekvenciou 400 kHz by bolo veľmi ťažké z výstupu zdroja odstrániť a jeho prítomnosť by pri napájaní sondového obvodu znehodnotila sondové meranie nadmerným šumom. Uvedený zdroj preto dovoľuje meniče od batérie výstupných kondenzátorov odpojiť. Sondový obvod je potom napájaný len z týchto kondenzátorov a rušivé napätie doň nepreniká. Sondové meranie je potrebné robiť s krátkymi prestávkami, počas ktorých sa kondenzátory opäť nabijú. Ak bude možné na jedno nabitie zmerať celú sondovú charakteristiku nebude meranie prepínaním takmer ovplyvnené. Prepínanie sa ovláda buď cez relé logickým pokynom na porte riadiaceho počítača alebo ručne vypínačom. Nabíjanie celkom vybitého zdroja trvá cca 10-20 minút, čo súvisí s formovaním veľkokapacitných elektrolytických kondenzátorov.

Výhoda používania tohoto zdroja pri meraní spočíva v tom, že zdroj je možné opakovane nabíjať a nieje potrebné starostlivo udržiavať v poriadku doteraz používané NiCd a NiMH akumulátory, vrátane nespoľahlivých kontaktov medzi nimi.

## 5.1.2 Merací modul U2351A

Ako meracia karta bol použitý modul Agilent U2351A, ktorý je k dispozícii v laboratóriu. Ide o modulárnu multifunkčnú jednotku na zber dát, ktorá obsahuje 12 bitový A/D prevodník s rýchlosťou 250 kS/s so 16 kanálovým multiplexerom na vstupe a dva 12 bitové D/A prevodníky s rýchlosťou 1MS/s. Toto zariadenie môže nahradiť v súčasnosti používanú laboratórnu kartu, ktorá je súčasťou aparatury na sondové merania. Jeho výhodou je pripojenie k počítaču cez rýchle USB 2.0 rozhranie. Modul je kompatibilný s celou radou softwarových vývojových nástrojov ako Agilent VEE, NI LabVIEW a Microsoft Visual Studio [6].

Pre ovládanie modulu sme zvolili vývojové prostredie Agilent Vee Pro, ktoré sa používa v laboratóriu. Kvôli prístupu na rozhranie USB bola potrebná verzia 7.5.



Obr. 6: Modul U2351A.

## 5.2 Tvorba softwaru pomocou Agilent Vee Pro 7.5

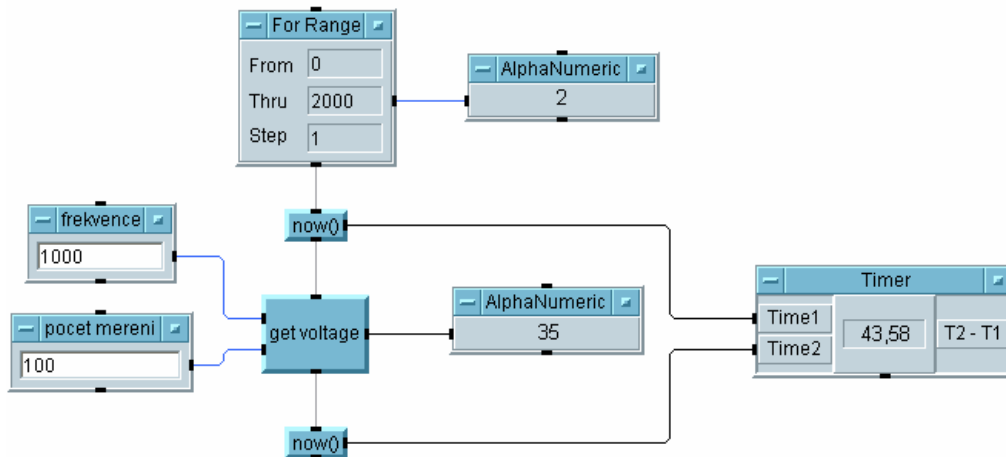
Súčasťou mojej bakalárskej práce bola tvorba a úprava softwaru určeného pre zber dát zo sondových meraní. Na splnenie tejto úlohy bolo použité vývojové prostredie programu Agilent Vee Pro 7.5, ktoré umožňuje pohodlnú a efektívnu komunikáciu medzi PC a pripojenými digitálnymi meracími prístrojmi.

Agilent VEE je grafický ikonický programovací jazyk, ktorý umožňuje získavať dáta, spracovávať ich a zároveň aj zobrazovať. Podobnými sú napríklad LabVIEW firmy National Instruments alebo TestPoint. Je to nástroj slúžiaci na uľahčenie experimentálnej činnosti. Dokáže komunikovať s ďalšími programami. Podporuje bežné programovacie jazyky ako C/C++, Visual Basic, Pascal a Fortran. V ďalších odstavcoch budú zhrnuté základné zásady programovania vo Vee s názornými ukážkami časti programu

### 5.2.1 Základy práce s Vee

Na začiatok je potrebné pochopiť rozdiely v práci s Vee a bežnými programovacími jazykmi. Vee programy sú tvorené vyberaním objektov z menu a ich spájaním. Výsledok má podobu blokovej schémy, ktorá je jednoduchšia na používanie a pochopenie než klasické kódy. Nie je nutné žiadne pracné editovanie, kompilácia, atď.

Vo vývojovom prostredí Vee pozostáva program z elementov, ktoré nazývame objekty. Tie vykonávajú rôzne funkcie: analýzu, zobrazovanie a vypisovanie dát. Tvorba programu spočíva vo výbere objektov z Vee menu ako *Flow*, *Datas*, *Display*. Súčasťou programu sú ďalej linky (čiary), ktorými sú jednotlivé objekty prepojené. Linky sa pripájajú na piny objektov, pričom každý objekt môže mať hneď niekoľko pinov, podľa potreby užívateľa. Na presun dát je nutné spojiť vstupné a výstupné piny príslušných objektov. To možno vidieť na obrázku 7.

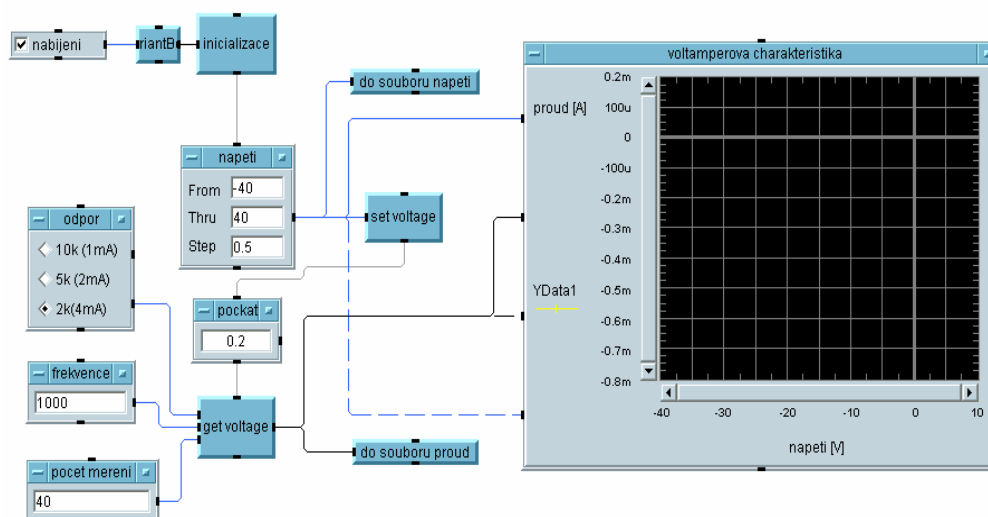


Obr. 7: Ukážka spojenia objektov cez dátové a sekvenčné piny.

### Pravidla pre tok dát vo Vee programe:

- Dáta tečú cez objekty logickou cestou zľava doprava. To platí pre všetky objekty s dátovými pinmi. Ľavé dátové piny sú vstupy, pravé sú výstupy.
- Všetky dátové vstupy musia byť pripojené. Objekt nezačne pracovať kým nenačíta všetky dáta na vstupoch, tie následne spracuje a prestane pracovať až keď sú aktivované príslušné dátové výstupy.
- Poradie v akom budú objekty pracovať je dané ich prepojením. Ako prvé budú pracovať objekty bez dátových vstupov.
- Vo Vee je ale možné ovplyvniť poradie objektov použitím sekvenčných pinov, ktoré sú na hornej (vstup) a dolnej (výstup) strane objektov. Sekvenčné piny sa bežne pripájajú nemusia. Keď sa však pripoja budú určovať postup výpočtov v programe (obr. 7).

Dôležitou funkciou programu je uloženie a načítanie dát ľubovoľného typu zo súboru. Na tento účel nám slúžia objekty *To File* a *From File*. Ukážka časti programu, ktorá zabezpečuje ukladanie nameraných dát je na obrázku 8. Program uloží hodnoty napätia a času do súborov *vybijeni.dat* a *cas.dat*.



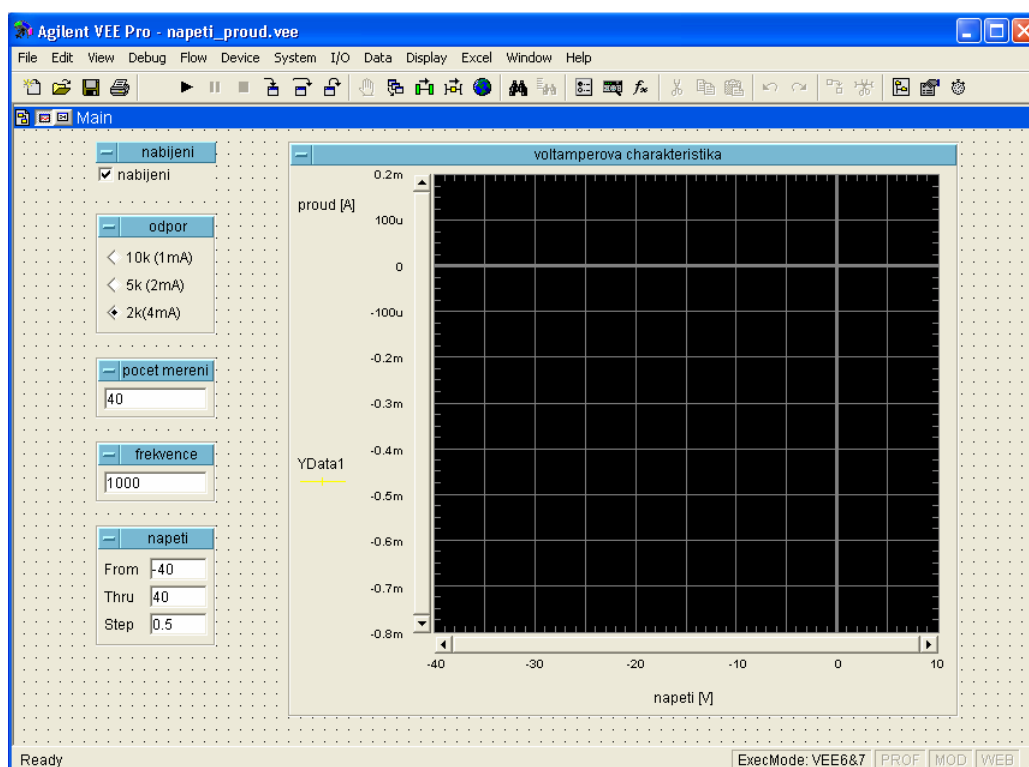
Obr. 8: Časť programu, ktorá zabezpečuje ukladanie získaných hodnôt do súborov a súčasne zobrazuje v grafe priebeh merania.

Od programu môžeme ďalej očakávať, aby získané dáta zobrazil. Na tento účel si môžeme vybrať z viacerých objektov. Medzi najčastejšie používané typy patrí *AlphaNumeric Display*. Ten zobrazí akýkoľvek formát dát, ktoré sú v programe použité. Často sú používané aj rôzne typy grafov ako možno vidieť na obrázku 8.

Vnútri programu môžeme vytvoriť logickú skupinu objektov, ktorú nazývame *UserObjects*. Ten funguje podobne ako hlavný program a pracuje sa s ním rovnako. Pripája sa na iné objekty v hlavnom programe. Takýmto spôsobom vytvárame podprogramy. Použitie užívateľských objektov môžeme pozorovať na obrázku 8. Objekt *set voltage* obsahuje podprogram, ktorý prikáže karte generovať napätie. Týmto členením (na podprogramy) má hlavný program jednoduchšiu štruktúru a je zrozumiteľnejší. Podrobnejšie informácie o programovaní s Vee možno nájsť v [7, 8].

## 5.2.2 Program na sondové merania

Program bol vypracovaný na meranie sondovej charakteristiky a súčasne ovládanie nabíjania zdroja pre sondový obvod. Uložený je pod názvom *napeti\_proud.vee*.



Obr. 9: Hlavný panel programu pre sondové merania.

Po otvorení súboru je potrebné navoliť zapnuté alebo vypnuté nabíjanie, ďalej rozsah napätia, v ktorom chceme merať a s akým krokom. Následne je potrebné zadať ešte frekvenciu, ktorou bude karta zbierať údaje a počet meraní pre jeden krok. Vo výbere odpor navolíme nastavený rozsah. Program spustíme kliknutím na tlačidlo „RUN“ v ľavej hornej časti obrazovky. Najprv prebehne inicializácia karty. Objektom *napeti* sa spustí cyklus, ktorý zabezpečuje krokovanie napätia. Podprogram *set voltage* vyšle karte povel na generovanie zadaného napätia a zároveň realizuje kalibráciu napätia. Potom sa aktivuje objekt *get voltage*. Ten obsahuje podprogram, ktorý spustí meranie. Zvolenou frekvenciou získava



a načíta určené množstvo hodnôt, ktoré následne prepočíta na sondový prúd a okalibruje ho. Program pokračuje v cykle nastavením novej hodnoty napätia, podľa zvoleného kroku a opäť sa získa príslušná hodnota prúdu. Hodnoty sondového prúdu sú vykresľované do grafu proti napätiu. Na grafe teda môžeme postupne sledovať priebeh voltampérovej (sondovej) charakteristiky. Pre prípadné ďalšie spracovanie sú namerané hodnoty ukladané do príslušných súborov *napeti.dat* a *proud.dat*. Hlavný panel programu je zachytený na obrázku 9.

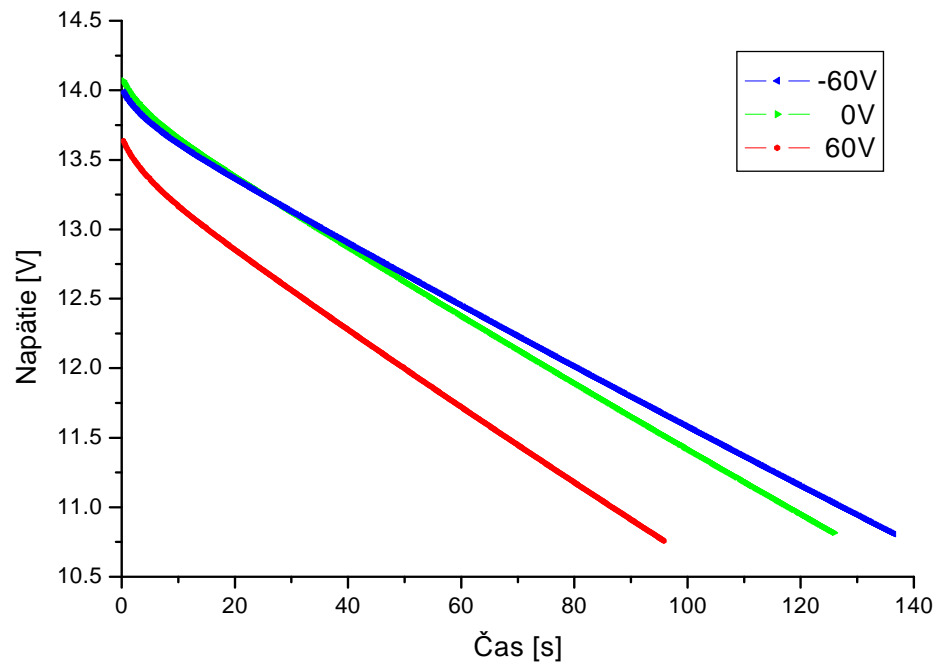
### 5.2.3 Program na meranie vybíjania zdroja

V rámci ďalšej úlohy bakalárskej práce bol pripravený program na meranie charakteristík zdroja pre sondový obvod. Opäť bolo použité vývojové prostredie Agilent Vee. Program je uložený v súbore *pokles.vee*. Slúži na zmeranie vybíjania jednotlivých vetví zdroja v závislosti na čase. Priebeh vybíjania je vykresľovaný do grafu. Zároveň sú hodnoty napätia a času ukladané do príslušných dátových súborov *cas.dat* a *vybijeni.dat*.

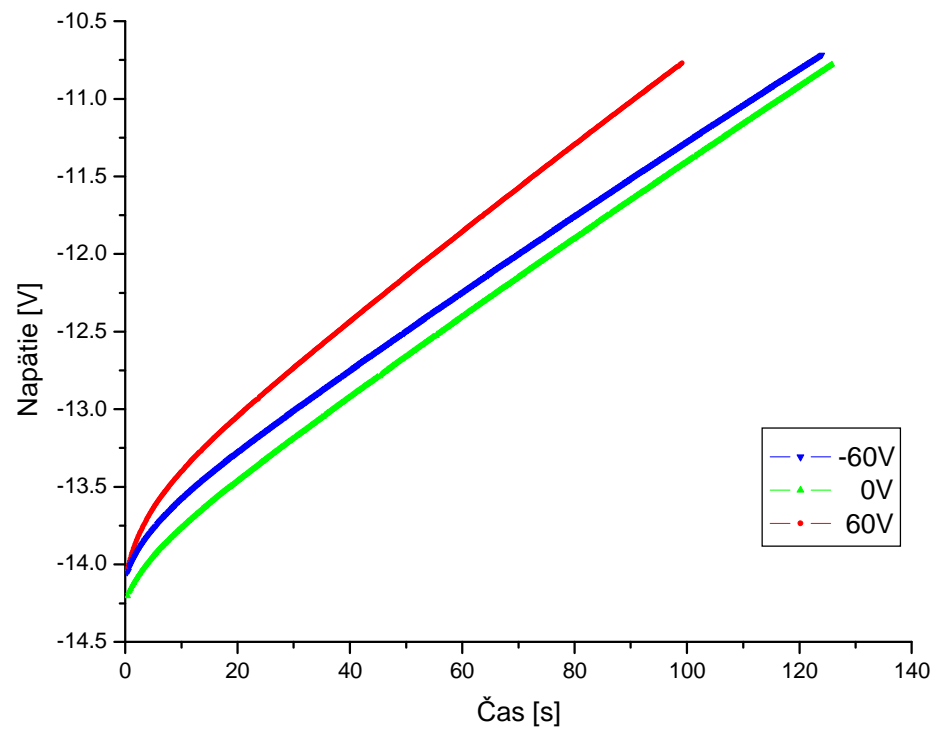
## 5.3 Meranie charakteristík zdroja

### **Overenie vhodnosti použitia izolovaného zdroja pri sondovom meraní**

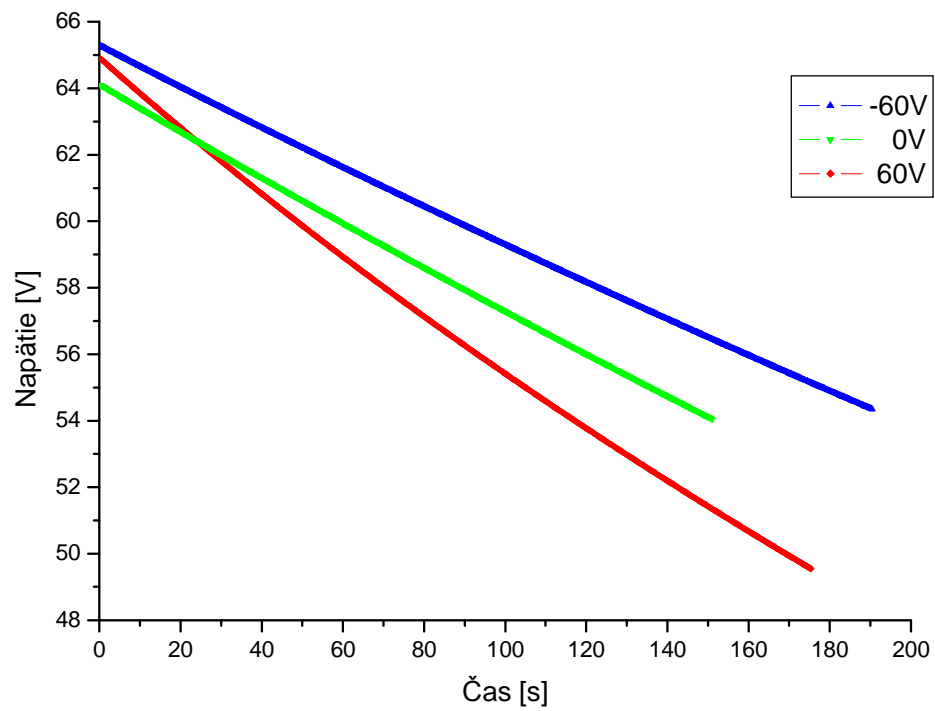
Izolovaný zdroj bol zapojený do sondového obvodu a pomocou meracieho modulu boli premerané jeho vlastnosti. Premeriavali sme vybíjanie jednotlivých vetví zdroja v závislosti na čase pri rôznom zaťažení. Z toho bude možné určiť ako dlho bude zdroj schopný napájať sondový obvod a či bude vôbec nutné sondové meranie kvôli opätovnému nabíjaniu prerušiť. Zmerané charakteristiky sú zachytené na nasledujúcich grafoch, ktoré boli zhotovené v programe Origin 6.1, ktorý bol k dispozícii v laboratóriu. Zdroj sme nechali vybíjať pri napätí -60 V, 0 V a 60 V na výstupe sondového obvodu. Graf 1 zachytáva vybíjanie 12 V vetvy. V grafe 2 je znázornené vybíjanie -12 V vetvy. Priebeh vybíjania 80 V vetvy zobrazuje graf 3. Vybíjanie -80 V vetvy vidíme na grafe 4.



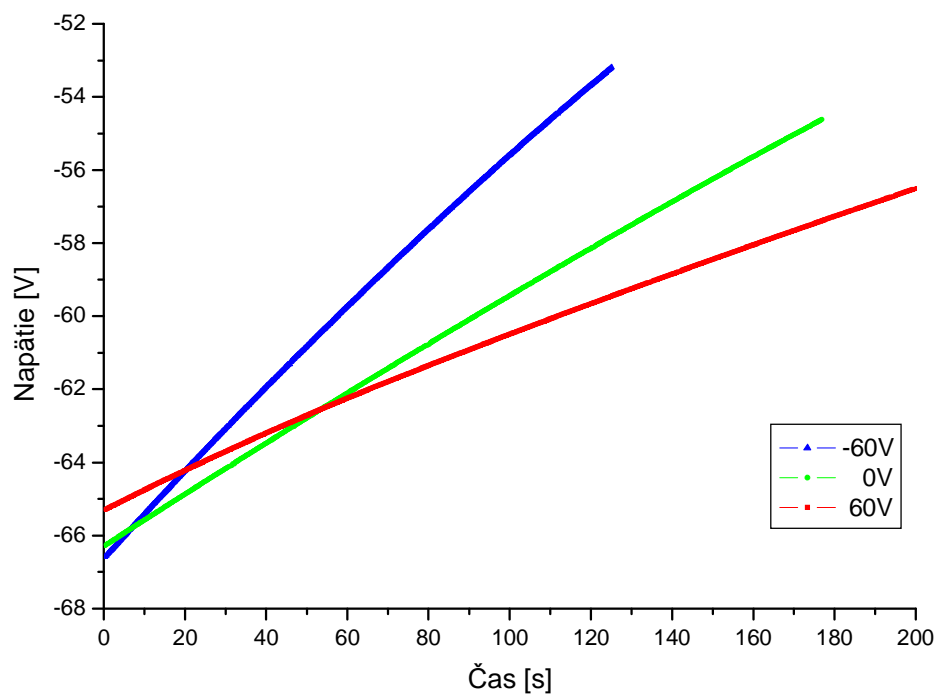
Graf 1: Pokles napätia v závislosti na čase na 12V vetve.



Graf 2: Pokles napätia v závislosti na čase na -12V vetve.



Graf 3: 80V Pokles napätia v závislosti na čase na 80V vetve.



Graf 4: Pokles napätia v závislosti na čase na -80V vetve.

### 5.3.1 Vyhodnotenie nameraných výsledkov

Namerané hodnoty boli pomocou programu Origin ďalej spracované. Hodnoty som následne lineárne fitovala. Pri fitovaní 12 V vetiev som vynechala počiatočné časti, ktoré sú zakrivené. Z popisu priloženému k zdroju sme určili kapacity kondenzátorov pre každú vetvu zdroja. Zo znalosti kapacity a koeficientu lineárneho poklesu napätia v čase sme vypočítali prúd v jednotlivých vetvách. Všetky spomínané hodnoty sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1: Hodnoty koeficientov poklesu napätia, kapacít a prúdu vo vetvách zdroja určené pri rozličnom napätí na výstupe sondového obvodu.

	dU/dt	kapacita [F]	prúd [mA]
12V vetva			
-60V	-0.022	0.67	-14.7
0V	-0.0243		-16.2
60V	-0.0285		-19
-12V vetva			
-60V	0.0253	0.36	9
0V	0.0259		9.2
60V	0.0301		10.7
80V vetva			
-60V	-0.0574	0.03	-1.7
0V	-0.0666		-2
60V	-0.087		-2.6
-80V vetva			
-60V	0.107	0.03	3.2
0V	0.0664		2
60V	0.0409		1.2

### 5.3.2 Diskusia

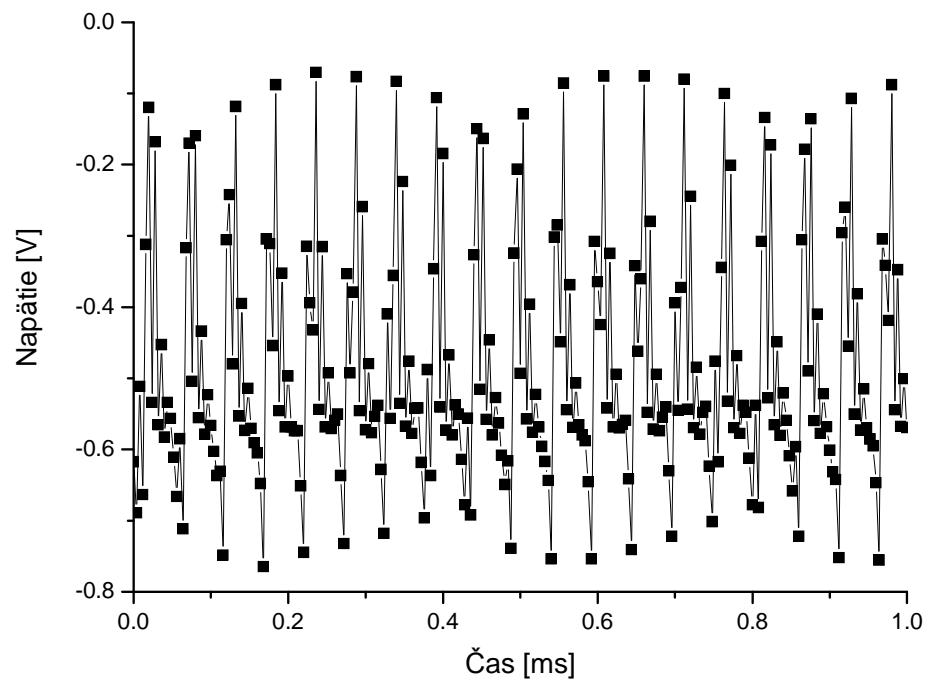
Zistené hodnoty prúdu odpovedajú hodnotám uvedeným v datasheete pre rôzne režimy práce obvodu ISO100 [9], ktorý funguje na optickom princípe. Prenos signálu cez izolačnú bariéru je v ňom realizovaný dvojicou: svietivá dióda a fotodióda. Prúdová spotreba hlavne kladnej vetvy preto závisí od veľkosti prenášaného napätia, lebo svietivá dióda je napájaná práve z tejto vetvy. Pri zvyšovaní napätia dióda svieti intenzívnejšie, preto je pokles napätia kladnej vetvy prudší.

Keď napätie klesne pod hodnotu cca 11,5 V je potrebné dať zdroj opäť nabíjať, pretože zosilňovače v sondovom obvode by nemali dostatočné napätie pre rozkmit výstupného signálu  $\pm 10$  V. Z grafu 1 a 2 vyplýva, že aj v prípade najväčšieho poklesu napätia sa zdroj vybíja minimálne 1 minútu, čo je dostatočný čas na zmeranie sondovej charakteristiky.

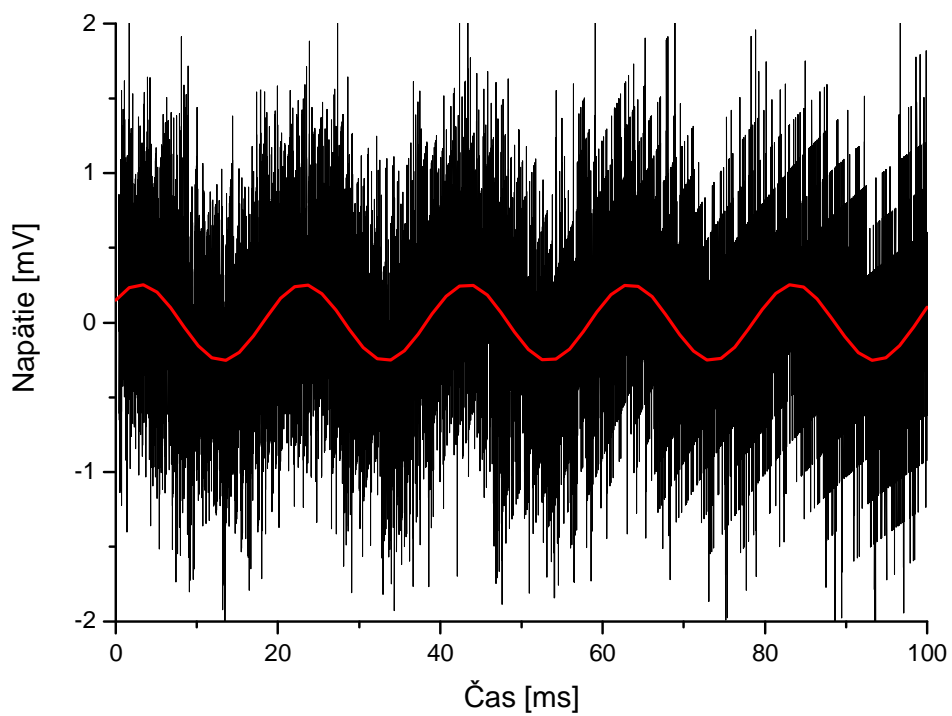
Pre obe 80 V vetvy je zmena prúdovej spotreby v závislosti na napätí nastavovanom na sonde menšia ako 2 mA. Aj u týchto vetví pri uvažovanom minimálnom napätí  $\pm 55$  V trvá pokles približne 100 sekúnd.

Ďalej sme sa pokúsili zistiť ako konkrétne bude meranie ovplyvnené, keď ponecháme zapnuté nabíjanie zdroja. Na obrázku 10 je zachytený rušivý šum spôsobený frekvenciou oscilátorov v DC/DC meničoch, ktorá je 400 kHz. Túto frekvenciu nie je možné kartou zachytiť, pretože vzorkovacia frekvencia meracej karty 250 kHz je na to príliš nízka. Z obrázku je napriek tomu patrné, že amplitúda rušenia je okolo 320 mV. Tento šum by spôsobil znehodnotenie merania sondovej charakteristiky. Preto je potrebné pri meraní meniče od batérie výstupných kondenzátorov odpojiť.

V prípade, že nabíjanie odpojíme, tak sa šum mnohonásobne obmedzí. To môžeme vidieť na obrázku 11. Amplitúda rušenia spôsobená meničmi, ktoré stále bežia, je teraz menšia ako 2 mV. Priebeh napätia sme fitovali harmonickým priebehom s frekvenciou zhruba 50 Hz. Perióda fitu bola 20,14 ms a amplitúda 0,26 mV. Fit je v obrázku vyznačený červenou farbou.



Obr.10: Priebek rušivého napätia na výstupe sondového obvodu pri zapnutom nabíjaní.



Obr 11: Priebek rušivého napätia na výstupe sondového obvodu pri odpojenom nabíjaní, fitovaný harmonickou funkciou (červená).

# Kapitola 6

## Záver

V rámci teoretickej časti bakalárskej práce bola spracovaná problematika týkajúca sa sondových meraní a diagnostiky plazmy. Práca sa zameriava hlavne na jednosondovú metódu.

Úlohou praktickej časti predkladanej práce bolo vytvoriť software pre USB merací modul Agilent U2351A. Tento software bol vytvorený pomocou ikonického programovacieho jazyka Agilent Vee Pro 7.5, ktorý sa používa v laboratóriu.

Ďalšou úlohou bolo premeranie vlastností galvanicky oddeleného zdroja napätia s DC/DC konvertormi a kondenzátormi s veľkou kapacitou z hľadiska jeho využitia pri sondovom meraní. Hodnoty získané meraním vybíjania zdroja sú vynesené v grafoch 1 až 4. Z nameraných dát vyplýva, že zdroj je schopný dostatočne dlho napájať sondový obvod a umožňuje zmeranie celej sondovej charakteristiky.

# Literatúra

- [1] Chen F. F.: *Úvod do fyziky plazmatu*, Academia, Praha, 1984
  
- [2] Martišovits V.: *Základy fyziky plazmy*, Univerzita Komenského Bratislava, 2006
  
- [3] <http://www.vakspol.cz/lsvt05/Tichy.pdf>
  
- [4] Jílek M.: *Diplomová práce*, KFPP, MFF UK, Praha, 2007
  
- [5] <http://www.ortodoxism.ro/datasheets/texasinstruments/dcp020503.pdf>
  
- [6] U2351A USB Modular Data Acquisition, Data Sheet, Agilent Technologies Inc., 2006
  
- [7] Rusz J.: *Diplomová práce*, KEVF, MFF UK, Praha, 1997
  
- [8] VEE Pro User's Guide, Agilent Technologies Inc., 2004
  
- [9] [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/I/S/O/1/ISO100.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/S/O/1/ISO100.shtml)