

## 1 Pracovní úkoly

1. Stanovte a graficky znázorněte charakteristiky vakuové diody (EZ 81) a Zenerovy diody (KZ 703).
2. Určete dynamický vnitřní odpor Zenerovy diody v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA.
3. Určete Zenerovo napětí  $U_z$ .
4. Pro tento proud (pracovní bod) zakreslete do grafu zatěžovací přímku pro napětí zdroje  $U_1 = 9\text{ V}$ .
5. Určete odpovídající stabilizační činitel.

## 2 Teoretický úvod

Diody jsou součástky, jejichž princip spočívá v tom, že při určitých napětích nepropouštějí proud a při jiných proud propouštějí a vykazují relativně malý odpor. Existuje ovšem více druhů diod, jejichž principy se mírně liší.

VA charakteristikou diody rozumíme závislost proudu  $I$ , který jí prochází v závislosti na na ni přivedeném napětí  $U$ . Pro diody se zavádí místo obvyklého odporu analogicky tzv. dynamický odpor, který je definovaný jako

$$r = \frac{dU}{dI}. \quad (1)$$

Vakuová dioda se sestává z vyčerpané baňky, kde je co nejvyšší vakuum (tj. co nejnižší tlak) a je v ní katoda a anoda oddělená vakuem. Katoda je žhavená, což vede k tomu, že z jejího povrchu unikají elektrony a vytváří kolem ní záporný elektronový oblak. I při nulovém napětí přivedeném na elektrody, pokud propojíme obvod, můžeme naměřit malý proud, který je určen právě tím, že některé elektrony se dostanou z katody až na anodu. Pokud přiložíme na elektrody kladné napětí, pak elektrony budou odsávány z oblasti kolem katody a budou s rostoucím proudem stále více přelétávat na anodu a poteče obvodem vyšší proud. Dle [1] je velikost emisního proudu z katody žhavené na teplotu  $T$  dána Richardsonovým-Dushmanovým zákonem

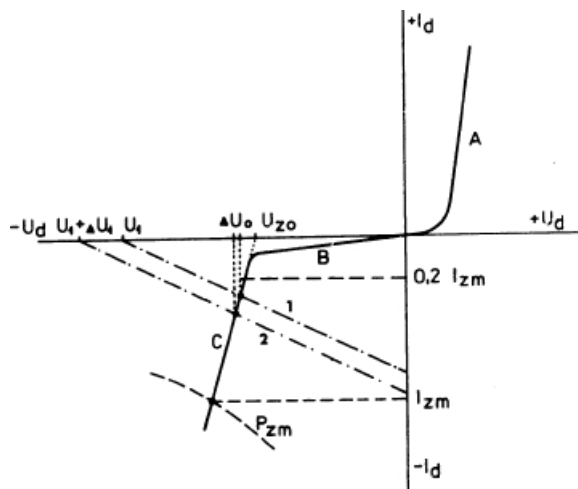
$$I = AST^2 \exp \frac{-w_0}{kT}, \quad (2)$$

kde  $A$  a  $w_0$  jsou konstanty charakterizující emisní látku katody,  $S$  je plocha katody a  $k$  je Boltzmannova konstanta. Závislost protékajícího proudu obvodem v závislosti na napětí dána tzv. třípolovinovým zákonem:

$$I = aU^{\frac{3}{2}}, \quad (3)$$

kde  $a$  je konstanta závislá na geometrii elektrod. Velikost emisního proudu je pak shora omezena vztahem (2).

Zenerova dioda je speciální případ polovodičové diody. Polovodičovou diodu tvoří jeden PN přechod, který propouští proud v jednom směru a v druhém ne. V propustném směru je závislost proudu na napětí exponenciální, kdežto v závěrném směru obyčejná polovodičová dioda proud nepropouští, pokud nepřekročíme tzv. průrazné napětí, kterým diodu nevratně nezničíme a proud začne procházet. Zenerova dioda je konstruována speciálně pro práci v závěrném směru a je vyrobena tak, že se pro určité závěrné napětí nezničí. Její charakteristika je na obrázku č. 1. Z grafu je vidět, že s kladným přiloženým napětím rychle roste proud. Se záporným přiložením napětím nejprve téměř žádný proud neteče, ale po přesáhnutí Zenerova napětí  $U_z$  opět rychle stoupá proud tekoucí skrz diodu - ovšem v opačném směru. Zenerova dioda se díky svým vlastnostem používá



Obrázek 1: Charakteristika Zenerovy diody - převzato z [1]

jako stabilizátor napětí. Stabilizační proud popisujeme stabilizačním činitelem  $S_u$ , který je definovaný jako poměr relativní změny vstupního napětí  $\Delta U_1/U_1$  k relativní změně výstupního napětí  $\Delta U_0/U_0$ :

$$S_u = \frac{U_0 \Delta U_1}{U_1 \Delta U_0} \quad (4)$$

Závislost proudu stabilizačním obvodem na napětí na diodě je zátěžová přímka a platí:

$$I_S = -\frac{U_1 + U}{R_S}. \quad (5)$$

### 3 Měření

#### 3.1 Chyba měření

Chybu měření počítám dle [2]. Celková chyba měření  $\sigma_f$  (pro veličinu  $f$ ) je určena jako

$$\sigma_f = \sqrt{\sigma_{stat}^2 + \sigma_{mer}^2}, \quad (6)$$

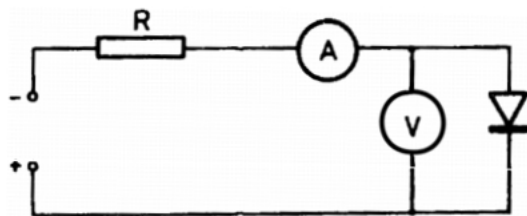
kde  $\sigma_{stat}$  je statistická chyba měření  $f$  a  $\sigma_{mer}$  je chyba měřidla (určená obvykle jako polovina nejmenšího dílku stupnice) použitého pro měření  $f$ .

Metoda přenosu chyb je pak pro veličinu vypočtenou z  $n$  jiných naměřených veličin  $x_i$

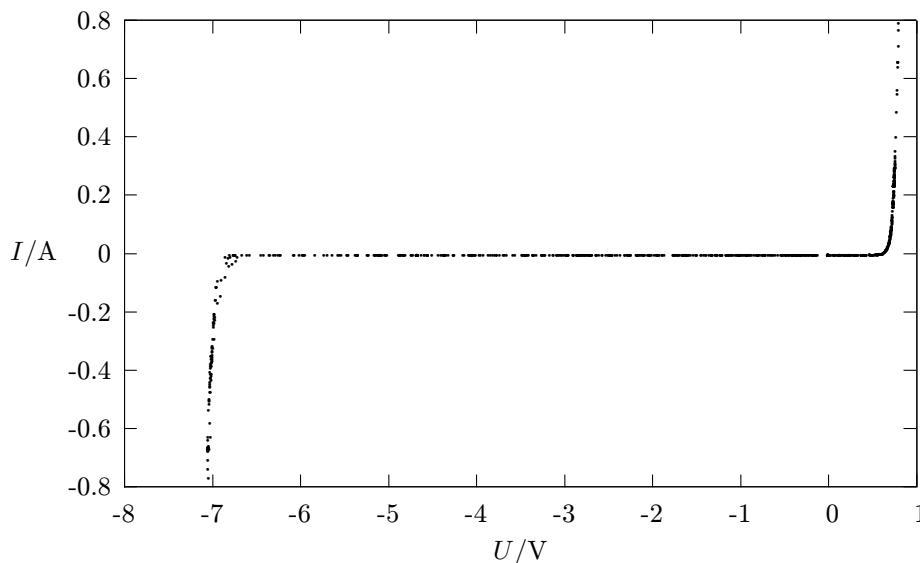
$$\sigma_f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (7)$$

#### 3.2 Měření

Měření voltampérové charakteristiky probíhalo na počítači. Zapojení bylo podle obrázku č. 2. Odpor voltmetru připojeného k počítači byl relativně velký a proto jsme mohli toto zapojení použít jak pro měření v oblasti, kdy prochází diodou proud, tak v oblasti, kde je proud nízký. Stejně tak chyba naměřených hodnot  $I$  a  $U$  pro jednotlivá měření bude malá a můžeme ji brát jako  $\pm 1$  na poslední platné cifře. Chybu pak budu počítat ze statistických odchylek při prokládání grafu. Grafy zpracuji, stejně jako jejich proložení, v programu Gnuplot. Gnuplot počítá proložení



Obrázek 2: Zapojení obvodu pro měření VA charakteristik



Obrázek 3: Graf VA charakteristiky Zenerovy diody v celém oboru

křivek pomocí metody nejmenších čtverců. Vzhledem k tomu, jaké množství dat bylo pomocí počítače naměřeno, tak k protokolu netisknu jejich celý seznam.

Kladné hodnoty napětí jsou vždy pro propustný směr a záporné pro závěrný.

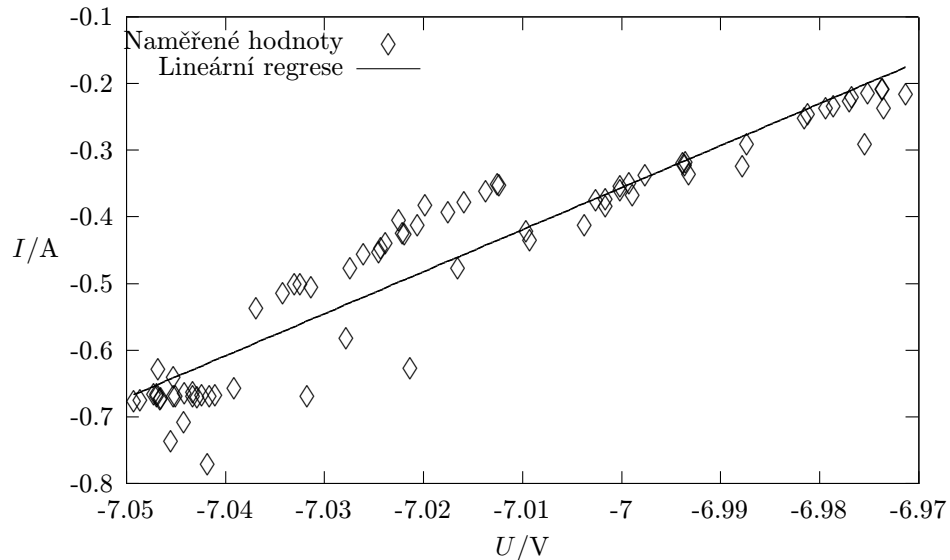
### 3.3 Zenerova dioda

Nejprve byla proměřena celá charakteristika diody - jak v propustném, tak v závěrném směru. Ta je vidět na obrázku grafu č. 3. Graf je omezený maximálním rozsahem proudu přípustným pro měření na zařízení, což bylo 0,8 A. Naměřeno v tomto rozsahu bylo 1000 hodnot. Tyto data pak byly použity pro tvorbu dalších grafů a analýzu jednotlivých částí charakteristiky.

Na obr. č. 4 můžeme vidět detail VA charakteristiky Zenerovy diody potom, co se dostala přes Zenerovo napětí v oblasti, která by již měla být relativně lineární. Vzhledem k tomu, že jsme si udělali takový detail, tak vidíme, že se tu objevuje jistá statistická chyba. V grafu je proložení přímkou, pomocí které určíme Zenerovo napětí  $U_Z$ . Prokládáme funkcí

$$i(u) = \tilde{I} + \frac{\tilde{I}}{|U_Z|}u,$$

kde  $u$  je napětí,  $i$  je proud a  $\tilde{I}$  nemá fyzikální význam (resp. - pokud by byla charakteristika diody v závěrném směru v celém oboru hodnot napětí lineární, pak by to byl proud procházející diodou při nulovém napětí).



Obrázek 4: Graf VA charakteristiky v závěrném směru

Proložením získáváme

$$\tilde{I} = (43,8 \pm 1,8) \text{ A}$$

$$U_Z = -(6,94 \pm 0,03) \text{ V}$$

Protože se v této oblasti chová dioda poměrně dobře lineárně, tak také můžeme z proložených dat určit diferenciální odpor pro 400 mA v závěrném směru.

$$r_- = \frac{dU}{dI} \approx \frac{U_Z}{\tilde{I}} = (0,159 \pm 0,006) \Omega$$

Obdobný postup jsem použil u propustného směru s tím rozdílem, že fitovaný interval je užší, protože se zde více projevuje exponenciální závislost, ale v oblasti 200 mA  $\pm$  100 mA můžu dobře aproximovat graf přímkou. Graf s proloženou přímkou je na obr. č. 5. Pro propustný směr pak vychází diferenciální odpor

$$r_+ = (0,163 \pm 0,002) \Omega$$

Poté jsme sestavili stabilizační obvod dle obrázku č. 6. Optimální odpor pro stabilizační obvod s  $I_S = -400 \text{ mA}$  je

$$R_S = -\frac{U_1 + U}{I_S} \approx 4,8 \Omega$$

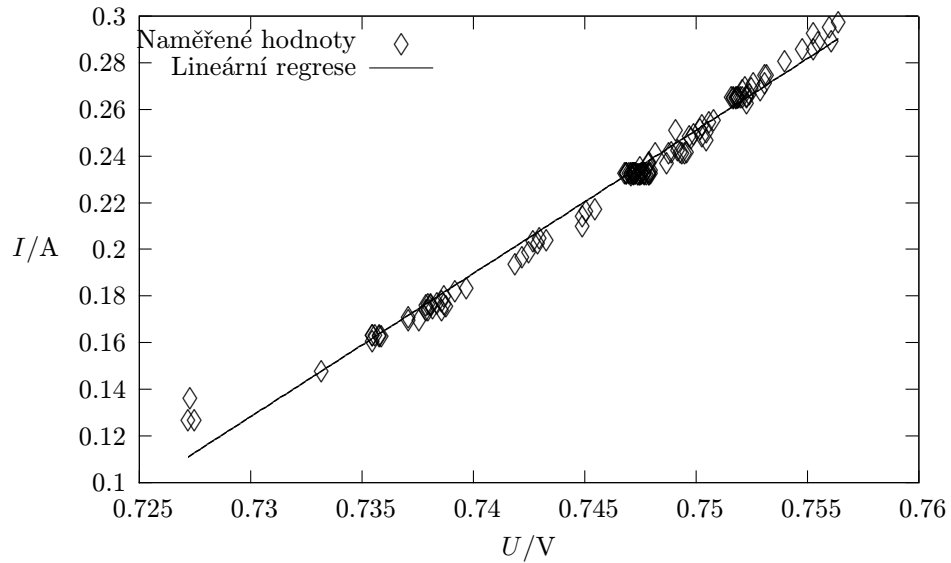
Použitý na odporové dekádě pak byl 5  $\Omega$ .

Z naměřených hodnot (viz. tabulka 1) jsem pak určil stabilizační činitel jako

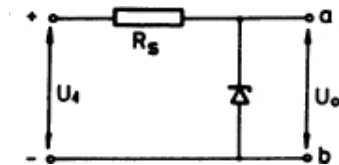
$$S = (20 \pm 1)$$

### 3.4 Vakuová dioda

Vakuová dioda byla měřena obdobným způsobem jako Zenerova dioda. Závislost proudu na napětí je v grafu obr. č. 7.



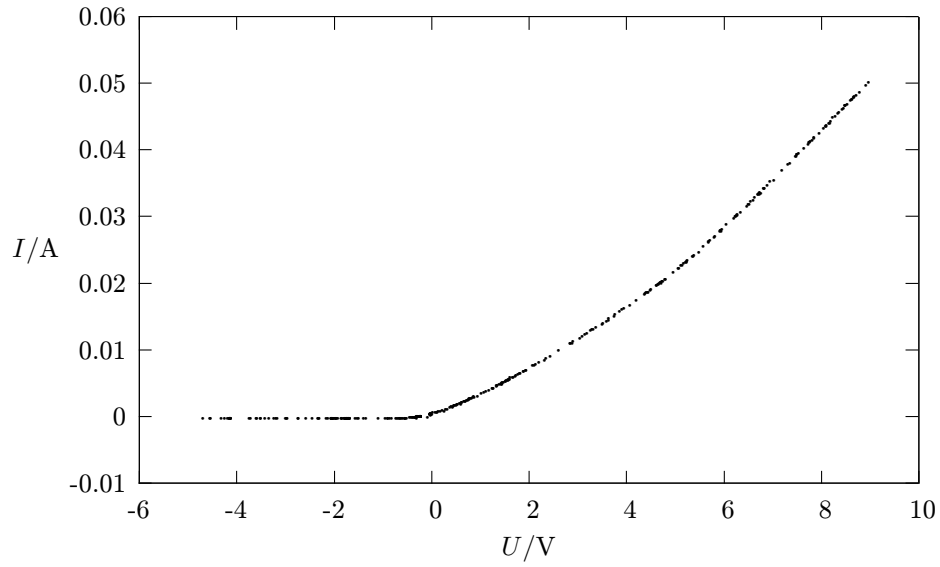
Obrázek 5: Graf VA charakteristiky v propustném směru



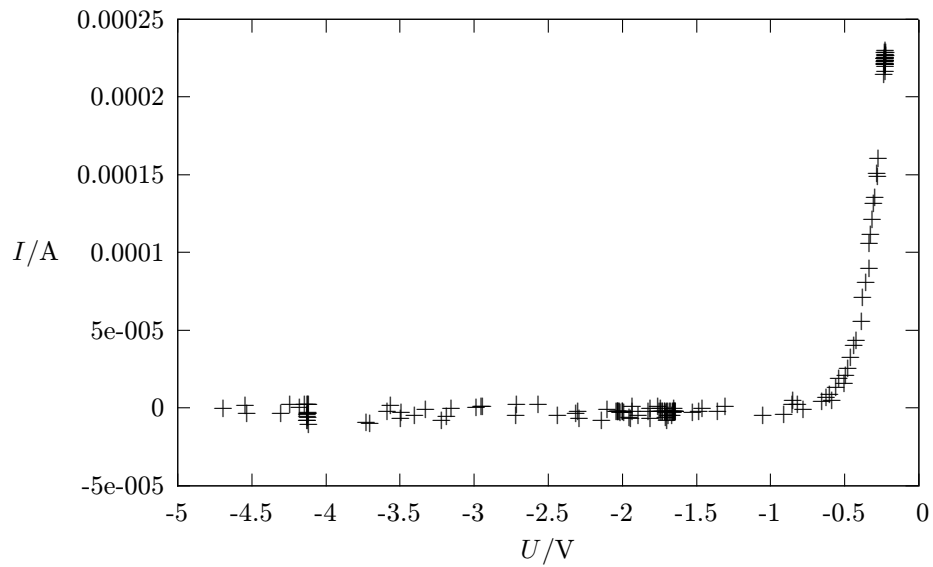
Obrázek 6: Stabilizační obvod

Tabulka 1: Určení stabilizačního činitele kolem pracovního bodu

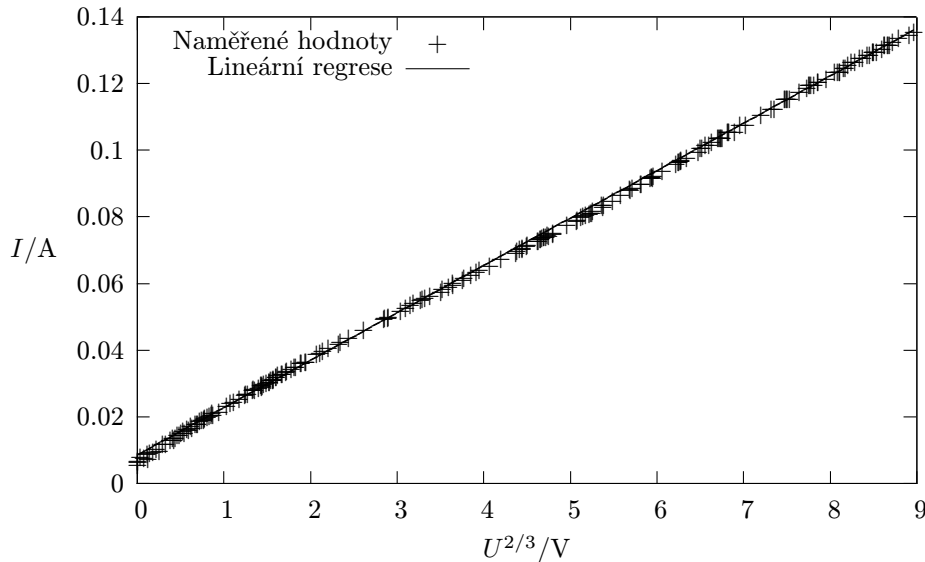
$U_1/V$	$U_0/V$
7,50	7,000
8,00	7,030
8,51	7,050
9,01	7,100
9,65	7,140
10,03	7,160



Obrázek 7: Graf VA charakteristiky vakuové diody celkový



Obrázek 8: Graf VA charakteristiky vakuové diody pro závěrný směr



Obrázek 9: Graf VA charakteristiky vakuové diody pro propustný směr

Pokud si uděláme výřez grafu, kdy se zajímáme o závěrný směr jako např. obr. č. 8, tak opravdu můžeme vidět, že pro malé závěrné napětí ještě stále teče proud opačným směrem, než přikládáme napětí a pro vyšší přiložené napětí už měříme prakticky jenom šum kolem nulové hodnoty proudu.

Ověření lineární regrese, jestli funguje pro vakuovou diodu třípolovinový zákon je pak ve grafu na obr. č. 9. A zákon opravdu funguje až na ten drobný detail, že je přímka trochu posunutá výše oproti počátku (proložení je tedy funkcí  $i(u) = A * u^{2/3} + B$ ), což se ale dá vysvětlit tím, že právě při nulovém napětí stále teče diodou proud a třípolovinový zákon říká, že při nulovém napětí je nulový proud.

## 4 Diskuse

Například v grafu na obr. č. 4 můžeme pozorovat evidentní rozštěpení lineární závislosti, kterou prokládáme, na dvě paralelní, což je nejspíše způsobeno tím, že data byla sbírána jak, když se najíždělo s diodou na větší přiložená napětí, tak pak bylo měřeno, když bylo napětí ubíráno. Rozštěpení tak vzniklo nejspíše tím, že obvod ke stabilnímu stavu postupně relaxuje, ale data byla sbírána ještě v době, kdy se napětí a proud neustálily.

Grafy pro určování diferenciálního odporu u Zenerovy diody byly prokládány přímkami, přestože by často lépe odpovídala exponenciální závislost, ale vzhledem k tomu, že bod, kde bylo potřeba určit diferenciální odpor se vždy nalézal přibližně uprostřed prokládaného intervalu a odchylky od přímky na vybraných grafech nebyly příliš velké, tak je použití linearizace dobře možné bez větší chyby.

Zanedbal jsem také chybu měřících přístrojů, ale ta byla opravdu zanedbatelná oproti statistické chybě.

## 5 Závěr

Naměřil jsem charakteristiky Zenerovy a vakuové diody a zanalyzoval jsem je. Ověřil jsem třípolovinový zákon u vakuové diody.

Zenerovo napětí použité diody je

$$U_Z = -(6,94 \pm 0,03) \text{ V}$$

Diferenciální odpor v propustném směru je

$$r_+ = (0,163 \pm 0,002) \Omega$$

a v závěrném směru

$$r_- = (0,159 \pm 0,006) \Omega$$

Určil jsem stabilizační činitel vytvořeného obvodu jako

$$S = (20 \pm 1)$$

## 6 Literatura

- [1] *R. Bakule, J. Šternberk:*  
**Fyzikální praktikum II - Elektřina a magnetismus**  
UK Praha, 1989
- [2] *J. English:*  
**Úvod do praktické fyziky I**  
Matfyzpress, Praha 2006
- [3] *J. Brož a kol.:*  
**Základy fyzikálních měření**  
SNTL Praha, 1983