

Pracovní úkoly

1. Změřte voltampérovou charakteristiku vakuové diody (EZ 81) bod po bodu.
2. Změřte voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody (KZ 703) pomocí převodníku UDAQ-1408E.
3. Pro Zenerovu diodu určete její dynamický vnitřní odpor v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA.
4. Určete odpovídající Zenerovo napětí U_Z .
5. Zakreslete do V-A charakteristiky zatěžovací přímkou pro napětí zdroje $U_I = -9$ V a proud tekoucí diodou $I = -350$ mA.
6. Sestavte stabilizátor napětí a ověřte jeho funkci.

Teoretická část

Vakuová dioda

Vakuovou diodu tvoří dvě elektrody v evakuované baňce, žhavením katody dochází k uvolňování elektronů. Tím vzniká v okolí katody vyšší hustota záporného náboje a mezi elektrodami vzniká napětí a teče emisní proud I_e , jehož velikost v závislosti na teplotě je daná Richardsonovým-Dushmanovým zákonem¹

$$I_e = AT^2 \exp(-w_0/kT) \quad , \quad (1)$$

A je hodnota závislá na materiálových vlastnostech katody (např. chemické složení, plocha, nebo čistota povrchu), w_0 odpovídá výstupní práci a k je Boltzmannova konstanta. Při absenci vnějšího elektrického pole mezi elektrodami se v okolí katody vytváří zvýšená hustota záporného náboje, část elektronů se tak vrací na katodu a elektrony které mají dostatečnou rychlost k překonání potenciálové bariéry se dostávají k anodě.²

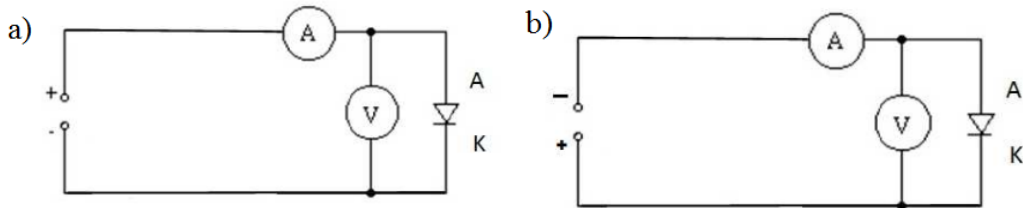
Pokud zapojíme diodu v závěrném směru, budeme emisní napětí snižovat až nebude diodou téct žádný proud. Při zapojení v propustném směru platí pro anodový proud tzv. Langmuirův vztah³

$$I_a = aU^{3/2} \quad , \quad (2)$$

kde a je konstanta daná geometrickým uspořádáním elektrod⁴. Anodový proud s s napětím roste až k hodnotě emisního proudu (1), při vyšším napětí už ale není dostatek nosičů náboje a proud dále neroste. Toho lze dosáhnout pouze u elektronek s katodou z čiského kovu, u běžných kysličnickových katod dochází průchodem většího proudu k lokálnímu přehřívání a tedy ke zvýšení emisního proudu.²

Pro měření voltampérové charakteristiky vakuové diody použijeme zapojení znázorněné na obrázku 1, v závislosti na měření závěrného nebo propusného směru použijeme zapojení a) nebo b).²

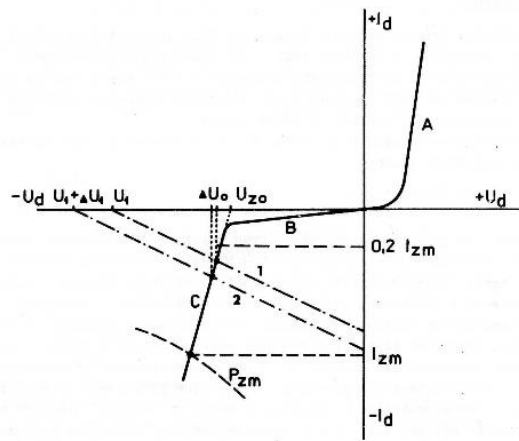
(11) Charakteristiky diod



Obrázek 1. Schéma zapojení pro měření VA charakteristiky diody. Pro měření propustného směru použijeme zapojení a), pro měření závěrného směru zapojení b).²

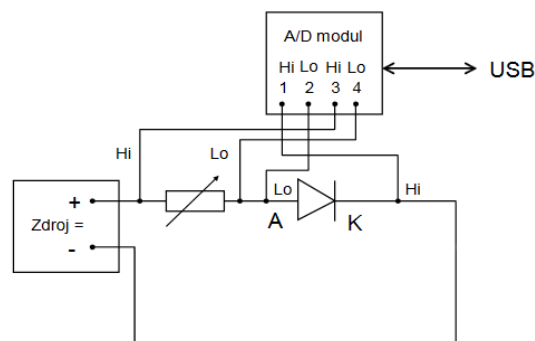
Zenerova Dioda

U polovodičových diod dochází při přiložení dostatečně velkého napětí v závěrném směru k průrazu PN přechodu. Zenerova dioda se na rozdíl od běžných polovodičových diod při průrazu nezničí. Napětí, při kterém dochází k průrazu označujeme jako U_{Z0} , překročením této hodnoty dochází k poklesu odporu diody a začíná jí protékat proud. V této průrazné části voltampérové charakteristiky je závislost proudu na napětí přibližně lineární a nachází se zde tzv. pracovní bod. Poloha pracovního bodu se předepisuje pomocí pracovního proudu I_Z a odpovídá mu Zenerovo napětí U_Z . Pracovní proud se nachází pod hodnotou I_{Zm} , která je daná maximálním ztrátovým výkonem. V zásadě se používá výrobcem doporučený pracovní bod. Typická voltampérová charakteristika Zenerovy diody je na obrázku 2.²



Obrázek 2. Typická charakteristika Zenerovy diody.²

Voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody měříme pomocí AD převodníku podle schématu na obrázku 3.²



Obrázek 3. Schéma zapojení Zenerovy diody pomocí AD převodníku.²

Stabilizátor napětí

Zenerova dioda se používá ke stabilizaci napětí.⁵ Schéma stabilizátoru je znázorněno na obrázku 4. Díky relativně nízkému odporu diody nad Zenerovým napětím se při vstupním napětí U_1 vyšším jak Zenerovo napětí a při vhodně zvoleném odporu R_S aby zatěžovací přímka protínala VA charakteristiku v lineární oblasti obvod chová jako stabilizátor⁶. Zvýšením vstupního napětí o ΔU_1 se výstupní napětí změní o ΔU_0 , kde platí $\Delta U_0 \ll \Delta U_1$. Zavádíme stabilizační činitel²

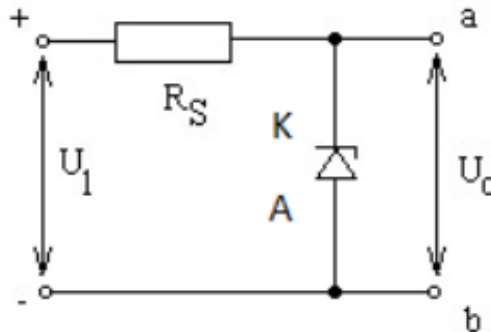
$$S_u = \frac{U_0 \Delta U_0}{U_1 \Delta U_1} \quad , \quad (3)$$

pokud dále zavedeme dynamický vnitřní odpor diody²

$$r_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \quad , \quad (4)$$

můžeme stabilizační činitel určit přibližně jako²

$$S_u \approx \frac{U_{z0}(R_S + r_i)}{U_1 r_i} \quad . \quad (5)$$



Obrázek 4. Schéma zapojení Zenerovy diody jako stabilizátoru napětí.²

Výsledky měření

Vakuová dioda

Obvod pro měření voltampérové charakteristiky byl zapojen podle obrázku 1 pro příslušný měřený směr. Měřená dioda byla EZ 81.

Jako voltmetr byl použit digitální multimetr MY-65 s vnitřním odporem $R_v = (10,0 \pm 0,2)M\Omega$ na všech použitých rozsazích. Přístrojová chyba je na rozsahu 2 V $\pm 0,1 \% \pm 0,3$ mV, na rozsahu 20 V $\pm 0,1 \% \pm 3$ mV a na rozsahu 200 V $\pm 0,1 \% \pm 30$ mV.

Jako ampérmetr byl použit digitální multimetr M-3270D, jeho přístrojová chyba je na rozsahu 400 $\mu A \pm 0,8 \% \pm 0,2$ μA , na rozsazích 4 mA (s dílkem 2 μA), 40 mA (s dílkem 20 μA) a 400 mA (s dílkem 200 μA) je chyba $\pm 1,2 \% \pm 2$ dig.

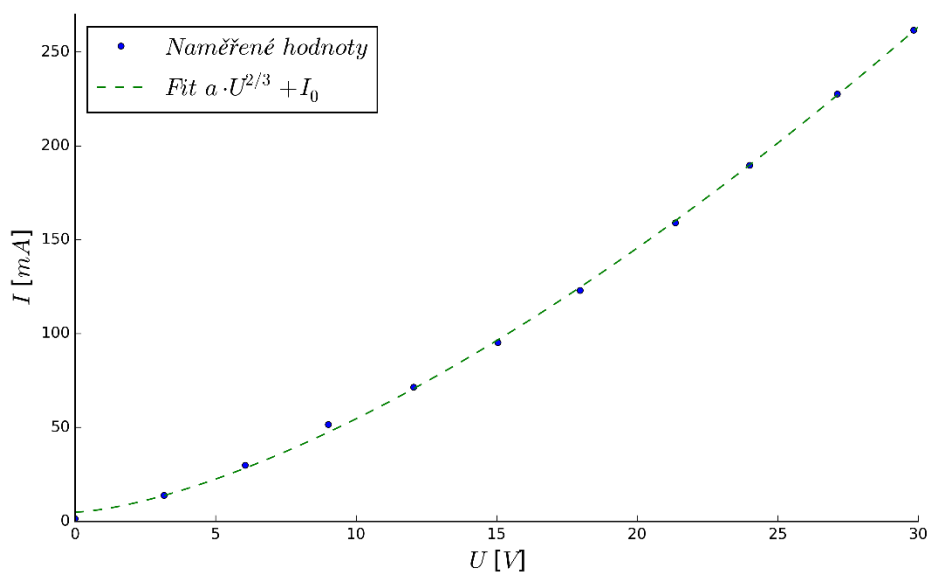
Pro měření byl vždy použit nejmenší možný rozsah.

(11) Charakteristiky diod

Naměřené hodnoty napětí a proudu v propustném směru jsou v tabulce 1, v grafu na obrázku 5 vidíme naměřené hodnoty proložené křivkou $I = a U^{3/2} + I_0$ pro ověření platnosti Langmuirova vztahu (2).

Tabulka 1. Hodnoty bodového měření VA charakteristiky vakuové diody v propustném směru.

U [V]	I [mA]
$0 \pm 0,001$	$1,36 \pm 0,06$
$3,169 \pm 0,006$	$13,8 \pm 0,2$
$6,051 \pm 0,009$	$29,9 \pm 0,4$
$9,01 \pm 0,01$	52 ± 1
$12,04 \pm 0,02$	71 ± 1
$15,04 \pm 0,02$	95 ± 2
$17,97 \pm 0,02$	123 ± 2
$21,36 \pm 0,05$	159 ± 2
$24,00 \pm 0,05$	189 ± 3
$27,12 \pm 0,06$	228 ± 3
$29,84 \pm 0,06$	262 ± 3



Obrázek 5. Naměřená VA charakteristika vakuové diody EZ 81 v propustném směru. Chybové úsečky odpovídají velikostem bodů.

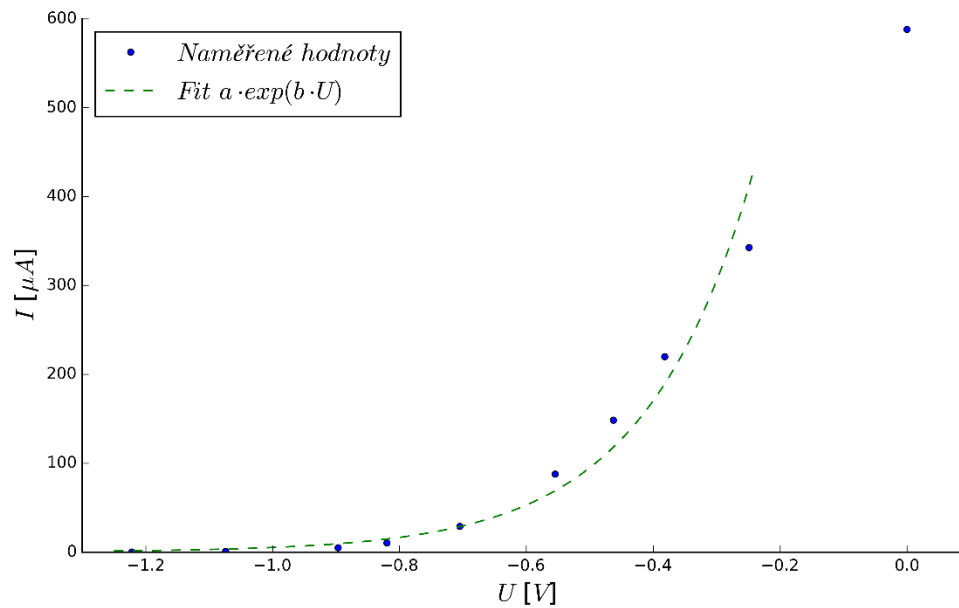
Parametry fitu jsou $a = (1,57 \pm 0,01)$ a $I_0 = (5 \pm 1) \text{ mA}$.

(11) Charakteristiky diod

Po naměření hodnot v propustném směru byl obvod upraven na měření v závěrném směru podle schéma na obrázku 1 b). Hodnoty naměřené v závěrném směru jsou v tabulce 2 a jsou vyneseny v grafu na obrázku 6.

Tabulka 2. Hodnoty bodového měření VA charakteristiky vakuové diody v závěrném směru. Chyby jsou pro hodnoty blízké nule nadhodnoceny pro zachycení chyby vzniklé výkyvy v napětí zdroje.

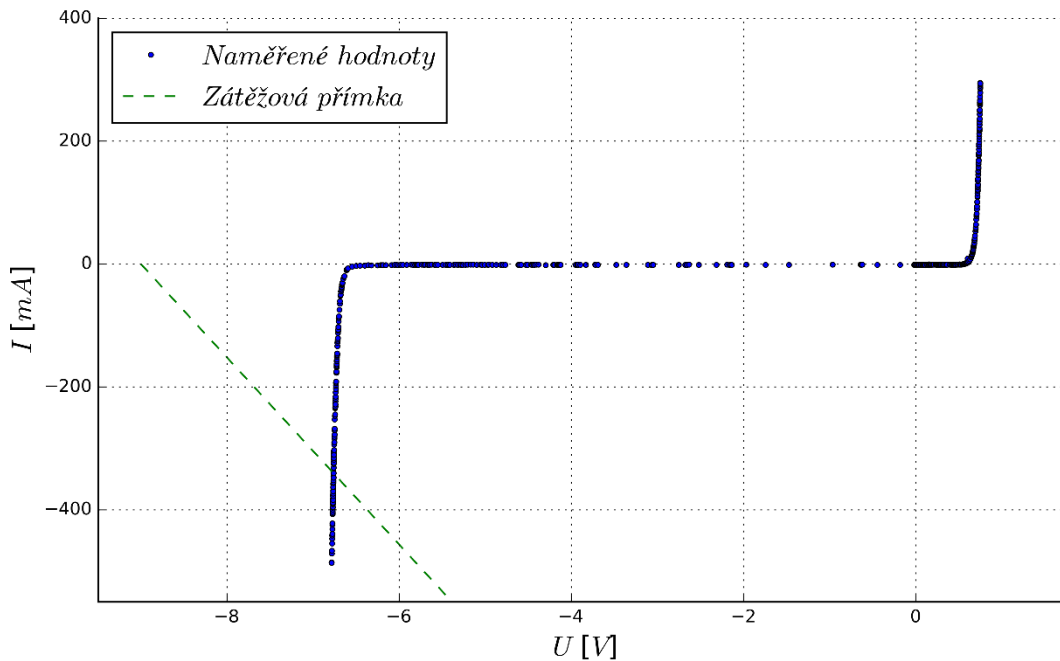
U [V]	I [μA]
$0 \pm 0,001$	590 ± 10
$-0,249 \pm 0,001$	343 ± 3
$-0,382 \pm 0,001$	220 ± 2
$-0,463 \pm 0,001$	148 ± 1
$-0,555 \pm 0,001$	$87,8 \pm 0,9$
$-0,705 \pm 0,001$	$28,8 \pm 0,5$
$-0,820 \pm 0,001$	$10,4 \pm 0,5$
$-0,897 \pm 0,001$	$5,0 \pm 0,5$
$-1,074 \pm 0,001$	$0,8 \pm 0,5$
$-1,222 \pm 0,002$	$0,0 \pm 0,5$



Obrázek 6. Naměřená VA charakteristika vakuové diody v závěrném směru. Graf je proložený exponenciální závislostí pro body dále od nuly. Chybové úsečky odpovídají velikostem bodů.

Zenerova dioda

Pomocí AD převodníku v zapojení podle obrázku 3 byla změřena voltampérová charakteristika Zenerovy diody KZ 703. Počítač v pravidelných časových intervalech zaznamenával hodnoty napětí a proudu. Napětí bylo regulováno ručně na zdroji, měření probíhalo do maximálních hodnot proudu 300 mA v propustném směru a -500 mA v závěrném směru. Z naměřených hodnot byla zkonstruována zátěžovací přímka pro napětí zdroje $U_1 = -9 \text{ V}$ a proud $I = -350 \text{ mA}$. Pomocí této přímky byl určen odpor $R_S = 6,6 \Omega$ pro pozdější konstrukci stabilizátoru. Naměřené hodnoty a zátěžovací přímka jsou vyneseny do grafu na obrázku 7.



Obrázek 7. Voltampérová charakteristika Zenerovy diody a zátěžovací přímka pro $U_1 = 9 \text{ V}$ a $I = -350 \text{ mA}$.

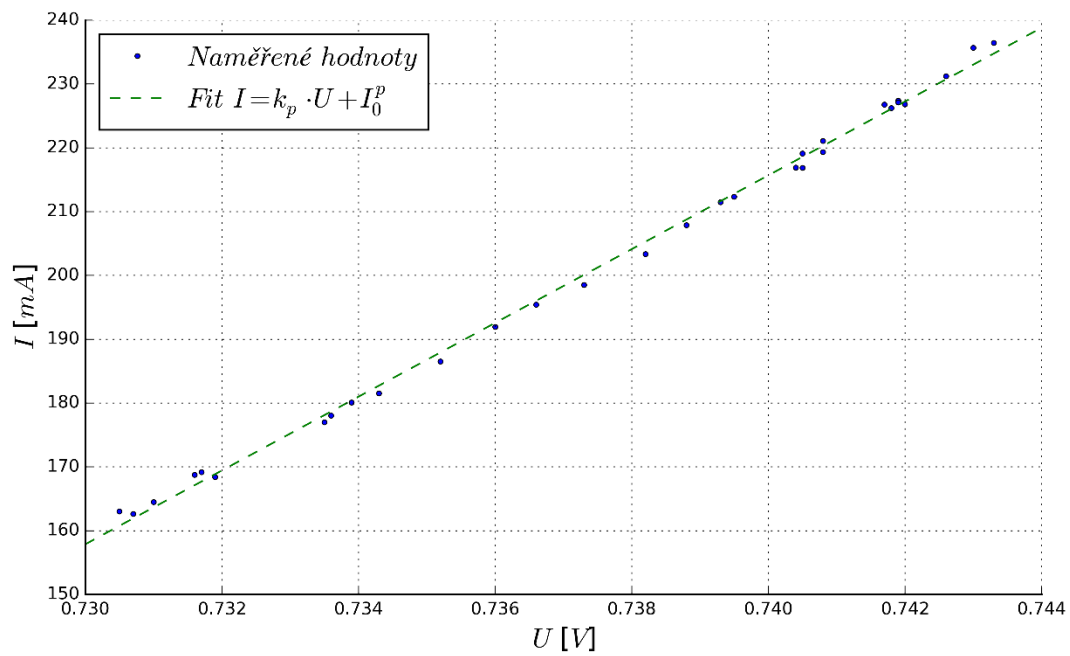
Dynamický vnitřní odpor byl určován v lineárních částech charakteristiky, naměřená data v okolí bodů, pro které jsme dynamický vnitřní odpor určovali, byla fitována přímkou $I = kU + I_0$. Podle vztahu (4) pak bude převrácená hodnota směrnice k udávat dynamický vnitřní odpor. Chyba dynamického vnitřního odporu je dána jako

$$\sigma_r = \frac{\sigma_k}{k^2} \quad (6)$$

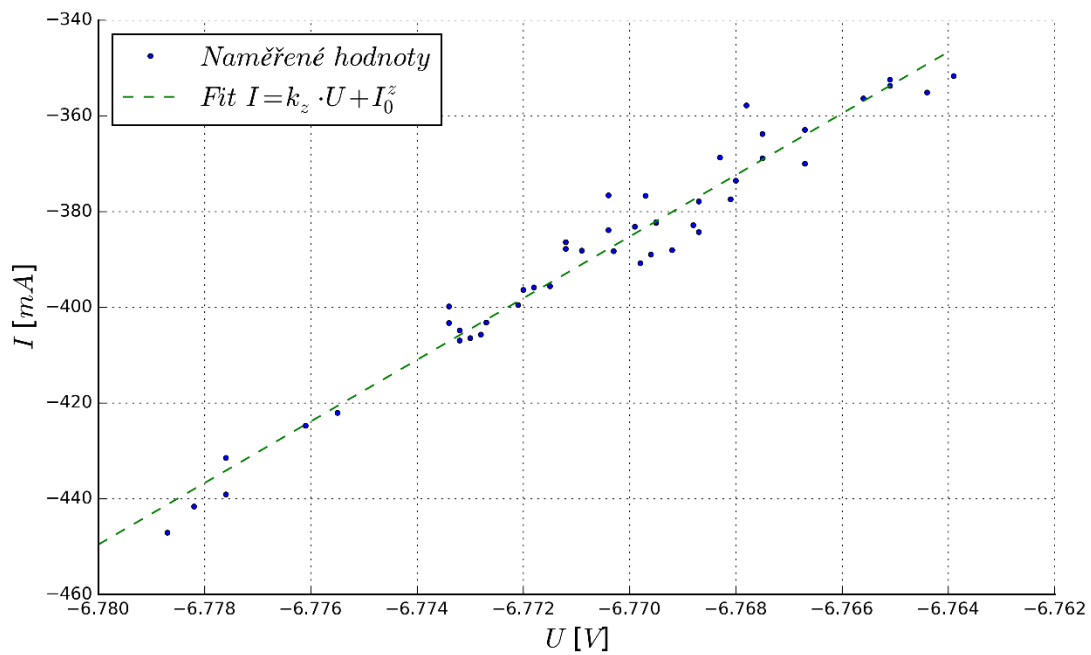
Pro proud $I = 200 \text{ mA}$ byla fitována data v rozmezí 160 mA až 240 mA . Grafické zpracování je na obrázku 8. Parametry fitu jsou $k_p = (5,78 \pm 0,05) \text{ A V}^{-1}$, $I_0^p = (-4,06 \pm 0,04) \text{ A}$, což dává dynamický vnitřní odpor $r_p = (0,173 \pm 0,002) \Omega$.

Pro proud $I = -400 \text{ mA}$ byla proveden fit v intervalu -350 mA až -450 mA . Grafické zpracování je na obrázku 9, parametry fitu jsou $k_z = (6,4 \pm 0,2) \text{ A V}^{-1}$, $I_0^z = (4 \pm 1) \text{ A}$. Dynamický vnitřní odpor pro proud -400 mA byl určen jako $r_z = (0,156 \pm 0,005) \Omega$.

(11) Charakteristiky diod



Obrázek 8. Určení dynamického odporu pro hodnotu $I = 200$ mA.



Obrázek 9. Určení dynamického odporu pro hodnotu $I = -400$ mA

(11) Charakteristiky diod

Zenerovo napětí určíme jako průsečík přímky $I = k_z U + I_0^z$, tedy

$$U_Z = -I_0^z/k_z, \quad (7)$$

chyba pak bude dána vzorcem

$$\sigma_{U_Z} = |U_Z| \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_0}}{I_0}\right)^2}. \quad (8)$$

Dostáváme tak hodnotu Zenerova napětí $U_Z = (-6,7 \pm 0,3) V$.

Stabilizátor napětí

V zapojení podle schématu na obrázku 4 byly měřeny hodnoty napětí na zdroji a na zátěži, napětí na zdroji bylo měřeno multimetrem M3270D s přesností $\pm 0,8\% \pm 2 \text{ dig}$. Napětí na zátěži bylo měřeno multimetrem MY-65, jehož parametry jsou uvedeny ve výsledcích měření vakuové diody. Hodnota R_S byla nastavena na odporové dekádě jako $6,6 \Omega$.

Naměřené hodnoty U_1 na zdroji a U_0 na zátěži jsou vypsány v tabulce 3 a znázorněny v grafu na obrázku 10.

Lineární aproximací $U_0 = a U_1 + b$ můžeme zjednodušit (3) jako

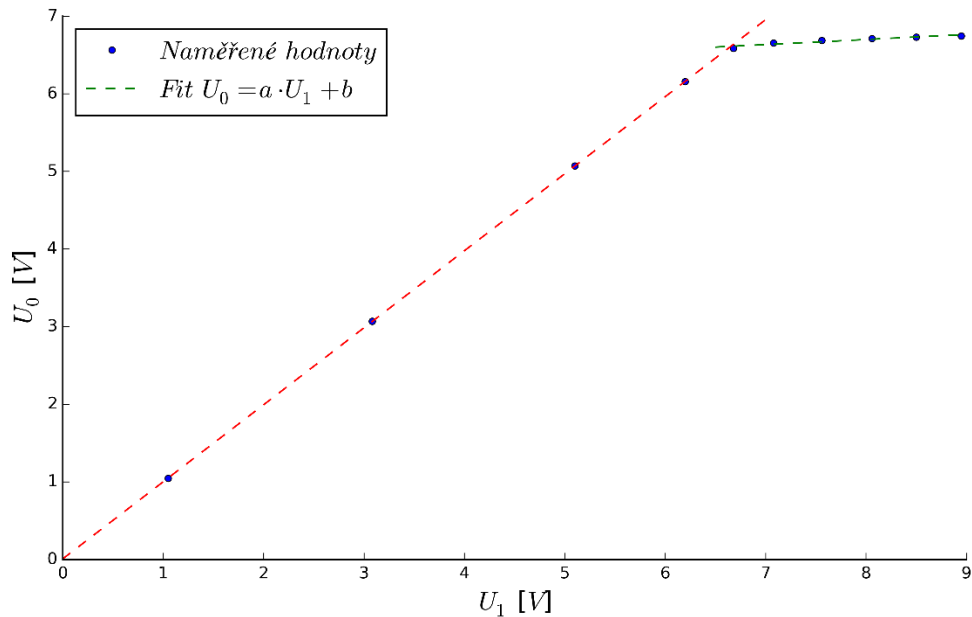
$$S_u = \frac{a U_1 + b}{U_1} \frac{\Delta U_1}{\Delta U_0} = 1 + \frac{b}{a U_1} \quad (9)$$

Provedením lineárního fitu na hodnoty nad Zenerovým napětím (zde bereme v úvahu i hodnoty blízké, tedy i $U_1 = 6,68 V$) dostaneme parametry $a = (0,07 \pm 0,01)$, $b = (6,18 \pm 0,09) V$. Stabilizační činitel tak pro hodnotu $U_1 = 9 V$ dopočteme jako $S_u = (11 \pm 2)$.

Tabulka 3. Hodnoty naměřené na stabilizátoru napětí.

$U_1 [V]$	$U_0 [V]$
$1,049 \pm 0,009$	$1,045 \pm 0,001$
$3,08 \pm 0,03$	$3,068 \pm 0,006$
$5,10 \pm 0,05$	$5,071 \pm 0,008$
$6,20 \pm 0,06$	$6,156 \pm 0,009$
$6,68 \pm 0,06$	$6,58 \pm 0,01$
$7,08 \pm 0,07$	$6,66 \pm 0,01$
$7,56 \pm 0,07$	$6,69 \pm 0,01$
$8,06 \pm 0,07$	$6,71 \pm 0,01$
$8,50 \pm 0,08$	$6,73 \pm 0,01$
$8,95 \pm 0,08$	$6,75 \pm 0,01$

(11) Charakteristiky diod



Obrázek 10. Ověření funkce stabilizátoru napětí. Vidíme, že nad Zenerovým napětím na zdroji nedochází k tak výraznému zvyšování napětí na zátěži.

Diskuze

Díky vysokému vnitřnímu odporu voltmetru je chyba vzniklá proudem procházejícím voltmetrem při měření charakteristiky propusného směru zanedbatelná.⁷ V závěrném směru se odpor diody zvyšuje a naměřené hodnoty velmi malých proudů jsou tak navíc zatíženy chybou vzniklou neprovedením korekcí. Charakteristika průběhu závislosti proudu na napětí je ale i bez korekcí ukázána dobře a odpovídá teoretickým předpokladům. V propustném směru byla ověřena platnost aproximativního Langmuirova vztahu, v závěrném směru pozorujeme postupný pokles proudu k nule. Charakter tohoto poklesu se dále od nuly podařilo poměrně dobře aproximovat exponenciální závislostí, blízko nuly ale tato aproximace neplatí, jak je vidět z grafu na obrázku 2.

Voltampérová charakteristika Zenerovy diody odpovídá předpokládané závislosti popsané v teoretické části, v přibližně lineárních oblastech se podařilo určit dynamické vnitřní odpory pro hodnoty proudu 200 mA a -400 mA . Funkce stabilizačního obvodu se Zenerovou diodou byla ověřena, pro hodnoty nad Zenerovo napětí dochází k mnohem menšímu nárůstu napětí na zátěži, než pro nižší hodnoty. Závislost napětí na zátěži na napětí na zdroji nad Zenerovým napětím byla aproximována přímkou, což nám umožnilo zjednodušení výpočtu stabilizačního činitele. Jeho hodnota odpovídá hodnotám uváděným v literatuře⁸. Použitím vzorce (5) odvozeným ve Studijním textu k Fyzikálnímu praktiku² dostáváme téměř čtyřikrát vyšší hodnotu. Zda je zde vzorec (5) špatnou aproximací, nebo naopak je špatně odvození (9) pomocí lineární aproximace U_0 vyžaduje další diskuzi, která není součástí této práce.

Závěr

Langmuirův aproximativní vztah pro závislost proudu na napětí ve vakuové diodě byl ověřen fitováním naměřených dat, parametry fitu byly určeny jako $a = (1,57 \pm 0,01)$ a $I_0 = (5 \pm 1) \text{ mA}$.

Voltampérová charakteristika Zenerovy diody odpovídá teoretickým předpokladům, dynamický vnitřní odpor pro proud 200 mA (v propustném směru) byl určen jako $r_p = (0,173 \pm 0,002) \Omega$ a pro proud -400 mA (v závěrném směru) jako $r_z = (0,156 \pm 0,005) \Omega$. Hodnota Zenerova napětí byla určena jako $U_z = (-6,7 \pm 0,3) \text{ V}$.

Dále byla experimentálně ověřena funkce stabilizačního obvodu se Zenerovou diodou, hodnota stabilizačního činitele ale vyžaduje další diskuzi.

Použité zdroje

¹ Wolf, B. *Handbook of ion sources*. CRC Press, 1995. ISBN 0849325021, 9780849325021. p.27,11

² Studijní text k Fyzikálnímu Praktiku II. 11. Charakteristiky diod.[online] [cit. 2018-12-27]. Dostupné online z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_218.pdf.

³ Langmuir, I. *The Characteristics of Tungsten Filaments as Functions of Temperature*. Phys. Rev. 1916, 7(3), 302-330. DOI: 10.1103/PhysRev.7.302.

⁴ Sedlák, B., Štoll, I. *Elektřina a magnetismus* Vyd. 2., opr. a rozš., Praha: Academia 2012.

⁵ Millman, J. *Microelectronics*. McGraw Hill., 1979 p. 45–48. ISBN 978-0071005968.

⁶ Horowitz, P, Hill, W. *The Art of Electronics (2nd ed.)*. Cambridge University Press. 1989 p. 68–69. ISBN 0-521-37095-7.

⁷ Schroder, D. K. *Semiconductor material and device characterization*. Third Edition. 2006. ISBN 0471739065.

⁸ Tichý, M, Chobot, O.. *Elektronika, skripta. Stabilizační dioda*. KFPP MFF UK. [online] [cit. 2018-12-29]. Dostupné online z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap2/2_2_3.html