

Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II

Úloha č. 11

Charakteristiky diod

Měřil a zpracoval: Antonín Baďura, FOF

Měřil dne: 26. října 2018

Odevzdal dne: 2. listopadu 2018

Poznámky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0–3	
Teoretická část	0–2	
Výsledky a zpracování měření	0–9	
Diskuse výsledků	0–4	
Závěr	0–1	
Seznam použité literatury	0–1	
Úhrnem	nejvýše 20	

Hodnotil dne

1 Zadání úlohy

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 VA charakteristiky zatěžovací přímku pro napětí zdroje $U_1 = -9\text{ V}$ a proud tekoucí diodou $I = -350\text{ mA}$.
6. Sestavte stabilizátor napětí a ověřte jeho funkci.

2 Teoretická část

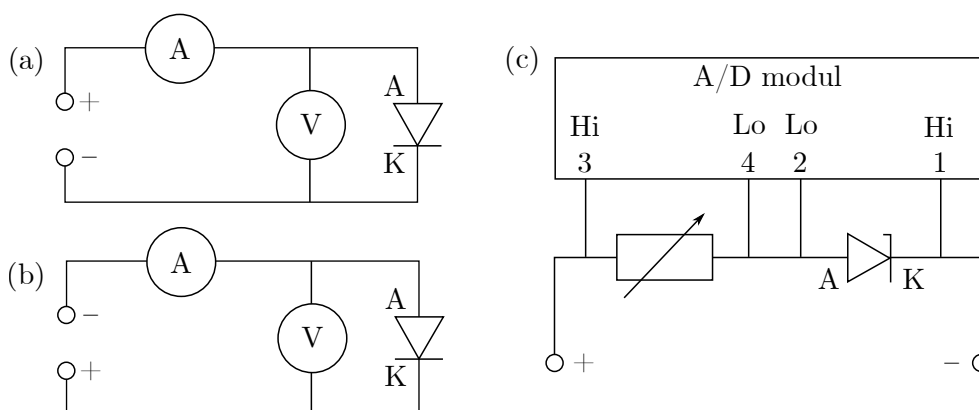
2.1 Vakuová dioda

Vakuová dioda je tvořena baňkou se dvěma elektrodami (anodou a katodou) a zdrojem elektronů — žhavicím vláknem. Celý prostor diody je evakuován, takže při přítomném elektrickém poli může procházet mezi elektrodami emisní proud, pro který při kladném napětí U_a (tedy pro propustný směr) platí Langmuirův vztah

$$I_a = aU_a^{3/2}, \quad (1)$$

kde a je konstanta závislá na geometrii elektrod. Ovšem i při nulovém napětí je na diodě měřitelný nenulový proud ($\approx 10^{-4}\text{ A}$), který je způsoben elektrony emitovanými ze žhaveného vlákna, při přiloženém napětí $\approx -1\text{ V}$ (v tzv. závěrném směru) je již proud neměřitelný [1].

Pro měření v propustném směru bylo použito zapojení dle 1 (a), pro měření v závěrném směru dle 1 (b).



Obrázek 1: Schéma zapojení (a) vakuové diody propustným směrem, (b) vakuové diody závěrným směrem, (c) Zenerovy diody (vytvořeno dle [1])

2.2 Zenerova dioda

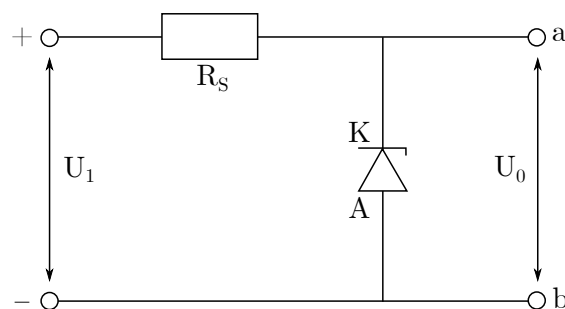
Zenerova dioda je zvláštní typ polovodičové diody, jejichž základem je obecně přechod PN. Podstatnou vlastní činností Zenerovy diody je průraz PN přechodu, při němž ovšem (na rozdíl od běžných polovodičových diod) nedojde k jeho zničení. To je umožněno pomocí dvou jevů: Zenerova jevu (tj. tunelovým přechodem elektronů přes zakázaný pás při dostatečně vysokém napětí) a lavinového efektu,

tedy vytrhávání valenčních elektronů pomocí elektronů urychlených přiloženým elektrickým polem. Pracovní oblast Zenerovy diody v závěrném směru je část VA charakteristiky, kdy již bylo dosaženo průrazu a závislost proudu na napětí je přibližně lineární počínaje napětím U_{Z0} . Právě v této oblasti se nachází pracovní napětí I_Z udané výrobcem a odpovídající Zenerovo napětí U_Z [1].

VA charakteristika Zenerovy diody byla měřena pomocí AD převodníku — schema zapojení je uvedeno v obrázku 1 (c).

Zenerova dioda se mj. využívá stabilizaci napětí, a to dle schematu 2. Při vyšším napětí U_1 než je napětí Zenerovo a při vhodně zvoleném odporu R_S (aby zatěžovací přímka protínala VA charakteristiku v pracovní oblasti) pracuje uvedený obvod jako stabilizátor, tedy při zvýšení vstupního napětí U_1 se zvýší napětí U_0 nepatrně (pro odpovídající přírůstky tak platí $\Delta U_0 \ll \Delta U_1$). Stabilizační obvod je možné například popsat stabilizačním činitelem S_u , a to jako [1] (pro r_i jako vnitřní odpor diody):

$$S_u = \frac{U_0 \Delta U_1}{U_1 \Delta U_0} \cong \frac{U_{Z0}(R_s + r_i)}{U_1 r_i}. \quad (2)$$



Obrázek 2: Schéma zapojení Zenerovy diody jako stabilizátoru (vytvořeno dle [1])

3 Výsledky měření

3.1 Vakuová dioda

K měření napětí na diodě EZ-81 byl použit voltmetr MY-65, který má na všech použitých rozsazích odpor $R_v = (10,0 \pm 0,2) \text{ M}\Omega$. Na rozsahu 2 V je zatížen nejistotou $\pm 0,1\% \pm 0,3 \text{ mV}$, na rozsahu 20 V $\pm 0,1\% \pm 3 \text{ mV}$ a na rozsahu 200 V $\pm 0,1\% \pm 30 \text{ mV}$. Pro měření proudu byl použit ampérmetr M-3270D, který dosahuje na rozsahu $400 \mu\text{A}$ nejistoty $\pm 0,8\% \pm 0,2 \mu\text{A}$, na rozsazích 4 mA (s nejmenším dílkem $2 \mu\text{A}$), 40 mA (dílek $20 \mu\text{A}$) a 400 mA (dílek $200 \mu\text{A}$) $\pm 1,2\% \pm 2 \text{ dig}$.

V grafu 3 a tabulce 1 jsou uvedeny naměřené hodnoty napětí a proudu na diodě. Hodnoty naměřeného proudu I_m byly pro nízké hodnoty napětí ($U < -0,6 \text{ V}$) mírně upraveny s přihlédnutím k vlastnímu odporu voltmetru, a to podle vztahu:

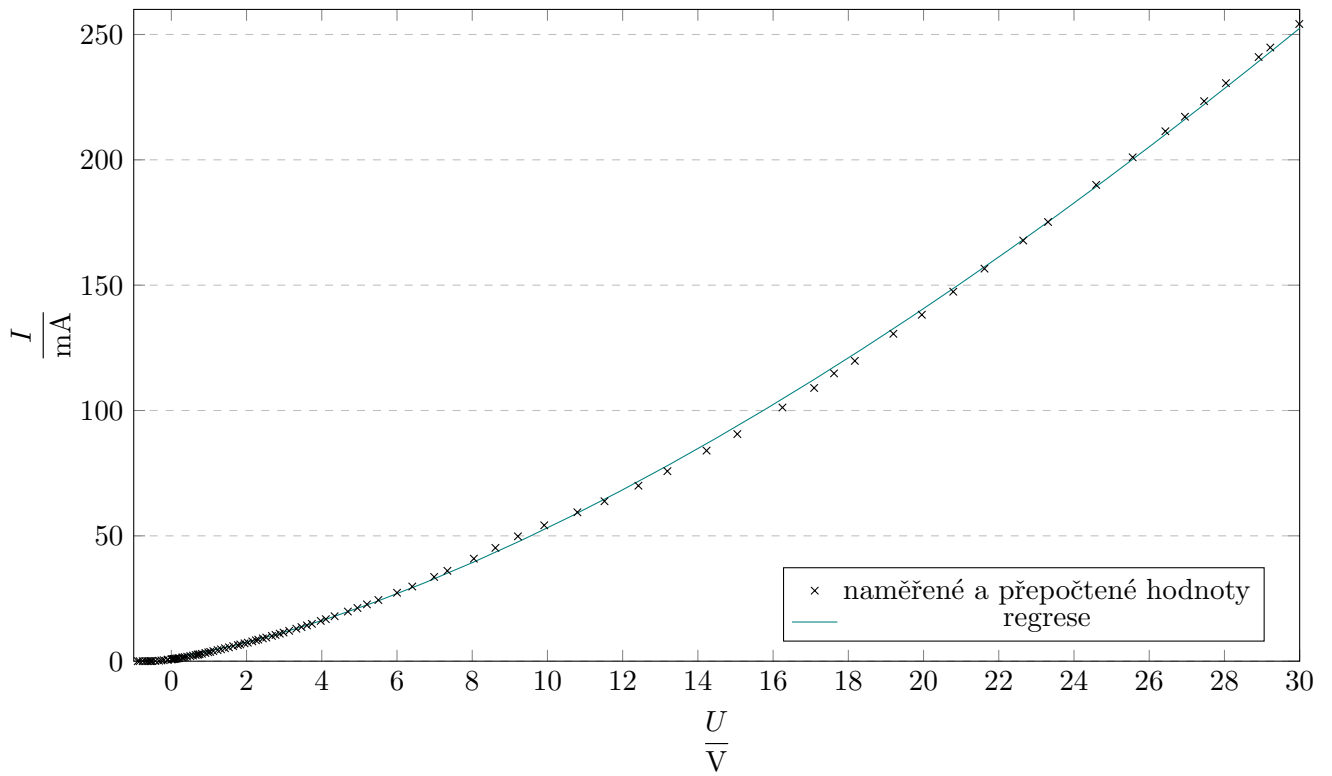
$$I = I_m - \frac{U}{R_v}. \quad (3)$$

U vyšších hodnot činila takto způsobená chyba zlomky procenta.

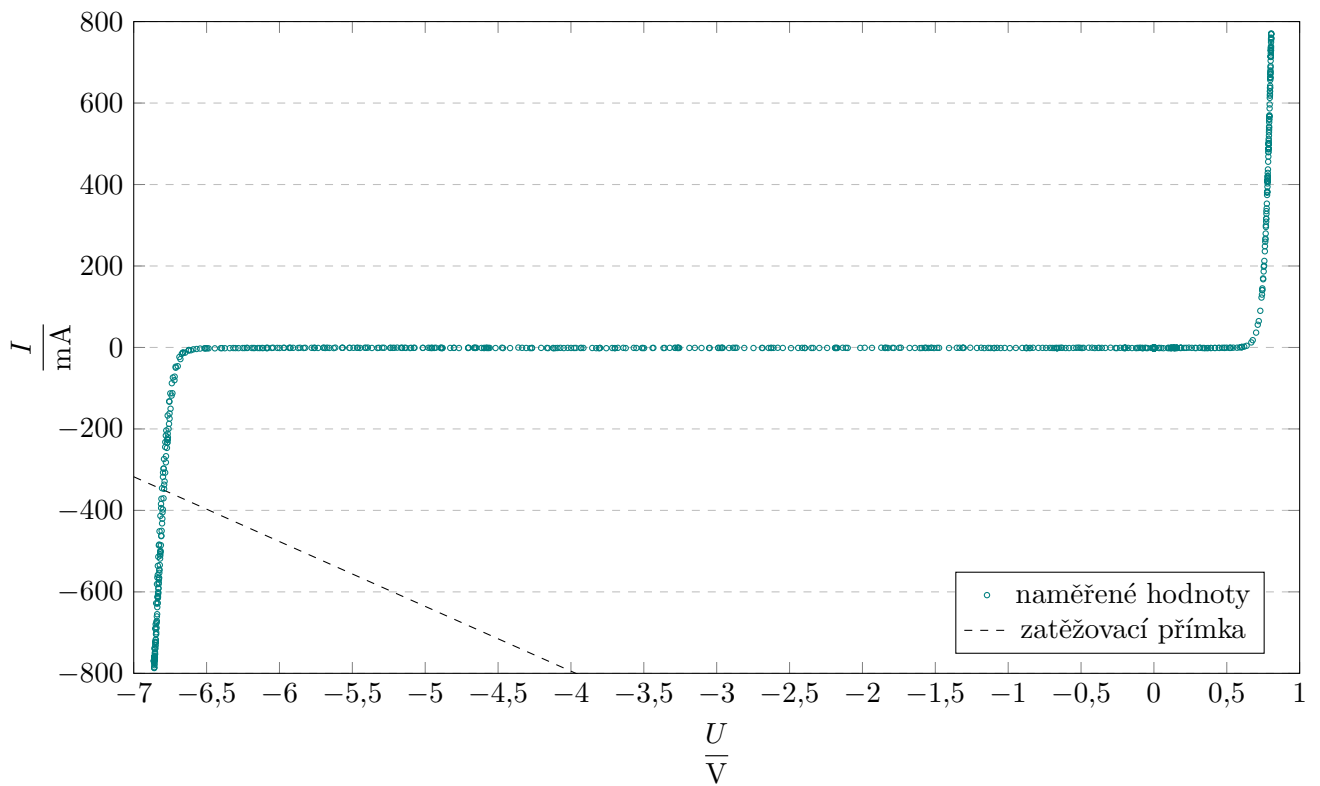
Hodnoty v grafu 3 byly popsány regresní křivkou vycházející ze vzorce 1 hledanou ve tvaru $I = a(U - b)^{3/2}$. Koeficient b vychází přímo z naměřených hodnot, a to jako $b = (-0,9550 \pm 0,0004) \text{ V}$, hodnota a byla spočtena iteračně pomocí metody nejmenších čtverců, $a = 1,466 \text{ mA/V}$ (nejistotu provedené regresní analýzy nejsem schopen určit).

3.2 Zenerova dioda

V grafu 4 je zobrazena VA charakteristika Zenerovy diody KZ-703, jak byla naměřena pomocí převodníku UDAQ-1408E při hodnotě odporu $R = 1 \Omega$, měření pomocí převodníku považujeme za přesné. Zároveň je v grafu uvedena zatěžovací přímka pro napětí zdroje $U_1 = -9 \text{ V}$ a proud tekoucí diodou $I = -350 \text{ mA}$.



Graf 3: VA závislost pro vakuovou diodu EZ-81 (nejistoty nejsou pro jejich malou velikost uvedeny), uvedena je rovněž regresní křivka pro $U > 0$ V



Graf 4: VA charakteristika Zenerovy diody KZ-703, jak byla změřena pomocí převodníku UDAQ-1408E, vč. zatěžovací přímky pro $U_1 = -9$ V a $I = -350$ mA

$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
-0,9550 ± 0,0004	0,0000 ± 0,0002	0,7503 ± 0,0004	2,80 ± 0,02	5,505 ± 0,004	24,40 ± 0,05
-0,8941 ± 0,0004	0,0003 ± 0,0002	0,8131 ± 0,0004	2,96 ± 0,02	6,001 ± 0,004	27,30 ± 0,05
-0,8443 ± 0,0004	0,0009 ± 0,0002	0,9063 ± 0,0004	3,28 ± 0,02	6,406 ± 0,004	29,78 ± 0,06
-0,7629 ± 0,0004	0,0023 ± 0,0002	0,9834 ± 0,0004	3,54 ± 0,02	6,988 ± 0,004	33,60 ± 0,06
-0,6894 ± 0,0004	0,0053 ± 0,0002	1,0343 ± 0,0004	3,72 ± 0,02	7,340 ± 0,004	36,04 ± 0,06
-0,6368 ± 0,0004	0,0091 ± 0,0002	1,1172 ± 0,0004	4,02 ± 0,02	8,043 ± 0,004	40,9 ± 0,2
-0,6071 ± 0,0004	0,0123 ± 0,0002	1,2284 ± 0,0004	4,42 ± 0,03	8,617 ± 0,004	45,2 ± 0,3
-0,5580 ± 0,0004	0,0191 ± 0,0002	1,3196 ± 0,0004	4,74 ± 0,03	9,215 ± 0,004	49,8 ± 0,3
-0,5406 ± 0,0004	0,0231 ± 0,0002	1,4256 ± 0,0004	5,16 ± 0,03	9,915 ± 0,004	54,2 ± 0,3
-0,5036 ± 0,0004	0,0339 ± 0,0002	1,5314 ± 0,0005	5,52 ± 0,03	10,796 ± 0,004	59,4 ± 0,3
-0,4240 ± 0,0003	0,0920 ± 0,0003	1,6447 ± 0,0005	5,98 ± 0,03	11,517 ± 0,004	63,8 ± 0,3
-0,3264 ± 0,0003	0,1818 ± 0,0003	1,7678 ± 0,0005	6,42 ± 0,03	12,419 ± 0,004	70,0 ± 0,3
-0,2635 ± 0,0003	0,2790 ± 0,0004	1,8331 ± 0,0005	6,68 ± 0,03	13,189 ± 0,004	75,8 ± 0,3
-0,2029 ± 0,0003	0,386 ± 0,002	1,9461 ± 0,0005	7,12 ± 0,03	14,231 ± 0,004	84,0 ± 0,3
-0,1014 ± 0,0003	0,592 ± 0,003	2,033 ± 0,003	7,40 ± 0,03	15,049 ± 0,005	90,6 ± 0,3
-0,0912 ± 0,0003	0,584 ± 0,003	2,152 ± 0,003	7,90 ± 0,03	16,249 ± 0,005	101,2 ± 0,3
0,0032 ± 0,0003	0,72 ± 0,02	2,248 ± 0,003	8,32 ± 0,03	17,091 ± 0,005	109,0 ± 0,3
0,0087 ± 0,0003	0,76 ± 0,02	2,312 ± 0,003	8,60 ± 0,03	17,620 ± 0,005	114,8 ± 0,3
0,0323 ± 0,0003	0,80 ± 0,02	2,433 ± 0,003	9,08 ± 0,03	18,173 ± 0,005	119,8 ± 0,3
0,0595 ± 0,0003	0,86 ± 0,02	2,524 ± 0,003	9,44 ± 0,03	19,198 ± 0,005	130,6 ± 0,4
0,0716 ± 0,0003	0,88 ± 0,02	2,674 ± 0,003	10,08 ± 0,03	19,954 ± 0,005	138,2 ± 0,4
0,0963 ± 0,0003	0,94 ± 0,02	2,771 ± 0,003	10,48 ± 0,03	20,79 ± 0,03	147,4 ± 0,4
0,1210 ± 0,0003	1,00 ± 0,02	2,882 ± 0,003	10,98 ± 0,03	21,62 ± 0,03	156,6 ± 0,4
0,1500 ± 0,0003	1,08 ± 0,02	2,983 ± 0,003	11,42 ± 0,03	22,65 ± 0,03	167,8 ± 0,4
0,1904 ± 0,0003	1,18 ± 0,02	3,132 ± 0,003	12,10 ± 0,03	23,31 ± 0,03	175,2 ± 0,4
0,2140 ± 0,0003	1,24 ± 0,02	3,324 ± 0,003	12,96 ± 0,04	24,59 ± 0,03	190,0 ± 0,4
0,2866 ± 0,0003	1,44 ± 0,02	3,460 ± 0,003	13,60 ± 0,04	25,56 ± 0,03	201,0 ± 0,4
0,3067 ± 0,0003	1,48 ± 0,02	3,606 ± 0,003	14,28 ± 0,04	26,43 ± 0,03	211,4 ± 0,5
0,3586 ± 0,0003	1,62 ± 0,02	3,737 ± 0,003	14,90 ± 0,04	26,95 ± 0,03	217,2 ± 0,5
0,4221 ± 0,0003	1,80 ± 0,02	3,973 ± 0,003	16,06 ± 0,04	27,46 ± 0,03	223,4 ± 0,5
0,5035 ± 0,0004	2,04 ± 0,02	4,108 ± 0,003	16,76 ± 0,04	28,04 ± 0,03	230,6 ± 0,5
0,5748 ± 0,0004	2,24 ± 0,02	4,341 ± 0,003	17,94 ± 0,04	28,91 ± 0,03	241,0 ± 0,5
0,6458 ± 0,0004	2,46 ± 0,02	4,694 ± 0,003	19,80 ± 0,04	29,22 ± 0,03	244,8 ± 0,5
0,6983 ± 0,0004	2,62 ± 0,02	4,948 ± 0,003	21,22 ± 0,05	29,99 ± 0,03	254,2 ± 0,5
0,7142 ± 0,0004	2,64 ± 0,02	5,201 ± 0,004	22,66 ± 0,05	—	—

Tabulka 1: Naměřené hodnoty (a případně zkorigované) VA charakteristiky diody EZ81

Dynamický vnitřní odpor pro 200 mA v propustém směru R_{200} a pro 400 mA v závěrném směru R_{-400} jsme určili ze směrnice lineární regrese naměřených dat. Dostáváme pak $R_{200} = (0,154 \pm 0,005) \Omega$ a $R_{-400} = (0,162 \pm 0,009) \Omega$. Zároveň můžeme z rovnice regresní křivky pro -400 mA odvodit hodnotu napětí $U_{Z0} = (-6,7 \pm 0,2) \text{ V}$.

Pro odpovídající Zenerovo napětí U_Z tak jednoduše dostáváme

$$U_Z = R_{-400}I + U_{Z0} = (6,8 \pm 0,3) \text{ V}. \quad (4)$$

3.3 Stabilizátor napětí

Funkce stabilizátoru byla ověřena pomocí zapojení ze schématu 2. Naměřené hodnoty napětí U_0 v závislosti na napětí zdroje U_1 jsou uvedeny v tabulce 2.

U_1/V	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5
U_0/V	6,48	6,65	6,68	6,70	6,72	6,73

Tabulka 2: Naměřené hodnoty závislosti napětí na stabilizátoru U_0 na vstupním napětí U_1 (v absolutní hodnotě)

Rovněž můžeme určit stabilizační činitel ze vzorce 2, a to jako:

$$S_u = 41 \pm 5. \quad (5)$$

4 Diskuse výsledků

Pro měření VA charakteristiky vakuové diody se ukazuje, že vnitřní odpor použitého voltmetru (který je dosti vysoký) velmi málo ovlivnil výsledek měření, který byl ještě navíc posléze korigován. Vysoký počet měřených hodnot umožnil značně snížit chybu statistickou, což je dobře patrné na proložení měřených dat regresní křivkou. Chyba přenesená byla minimalizována použitím měřicích přístrojů s nízkou chybou měření.

Od teoretického předpokladu se odchyluje proud procházející vakuovou diodou při nulovém napětí určený pomocí předpokládaného Langmuirova vztahu, a to jako $I(0) \cong 1,37 \text{ mA}$. Blíže předpokládané hodnotě $\approx 10^{-4} \text{ A}$ je přímo naměřená hodnota proudu pro napětí $3,2 \text{ mV}$, a to $0,72 \text{ mA}$.

V případě měření Zenerovy diody byla VA charakteristika měřena rovněž dosti přesně (resp. měření pomocí převodníku považujeme za přesné). Vyšší nepřesností byly zatíženy veličiny určené nepřímou, především hodnoty dynamického odporu, které byly určeny z lineární regrese, a hodnoty Zenerova napětí odtud dopočítané. Ukázalo se, že na celá oblast průřezu nemůže být dobře reprezentována jedinou lineární závislostí, proto byla regrese provedena pouze na okolí požadovaných bodů, přesto je regresní analýza zatížena dosti značnou chybou.

V poslední části byla ověřena funkce stabilizátoru — skutečně se ukázalo, že pro vyšší hodnoty napětí na Zenerově diodě než bylo napětí Zenerovo docházelo k stabilizaci napětí. Kvantitativní přesnost měření (a tedy určení činitele S_u) byla poznamenána nepřilíš přesným měřením vstupního napětí U_1 .

5 Závěr

VA charakteristika vakuové diody EZ-81 byla popsána rovnicí $I_a = a(U_a - b)^{3/2}$ s určenými konstantami $a = 1,466 \text{ mA/V}$ a $b = (-0,9550 \pm 0,0004) \text{ V}$.

VA charakteristika Zenerovy diody KZ-703 je uvedena v grafu 4. Dynamický odpor diody byl určen pro 200 mV v propustném směru jako $R_{200} = (0,154 \pm 0,009) \Omega$ a pro 400 mV v závěrném směru jako $R_{-400} = (0,162 \pm 0,009) \Omega$. Odpovídající Zenerovo napětí bylo určeno jako hodnota $U_Z = (6,8 \pm 0,3) \text{ V}$.

Funkce stabilizátoru napětí byla ověřena a stabilizační koeficient byl určen: $S_u = 41 \pm 5$.

Uvedené hodnoty odpovídají hladině pravděpodobnosti $\approx 99,7\%$.

Literatura

- [1] *Studijní text k základnímu fyzikálnímu praktiku II, úloha 11* [online]. KVOF MFF UK [cit. 2018-24-10]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_211.pdf