

## 1 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 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

Vakuovou diodu tvoří dvě elektrody umístěné ve vakuu. Při oteplování katody z ní unikají elektrony a velikost tohoto emisního proudu je dána Eichardsonovým-Dushmanovým zákonem [1]

$$I = AST^2 \exp(-w_0/kT) \quad (1)$$

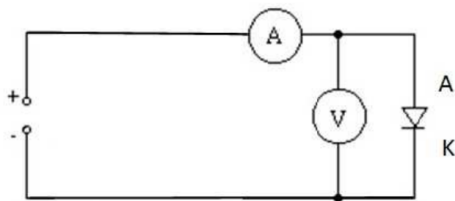
kde  $T$  je teplota katody,  $S$  její plocha,  $k$  Boltzmanova konstanta a  $A, w_0$  jsou konstanty určené materiálem, z kterého je katoda vyrobena. Ne všechny emitované elektrony se dostanou na anodu a v okolí katody se tak vytvoří prostorový náboj. Na anodu se pak dostanou pouze elektrony s dostatečnou energií.

Bez přiloženého napětí prochází mezi elektrodami pouze malý proud. Pokud napětí mezi anodou a katodou dále snižujeme, zapojíme tedy diodu v závěrném směru, bude tento proud dále klesat až do neměřitelných hodnot. Pokud naopak napětí zvyšujeme až do kladných hodnot, zapojíme tedy diodu v propustném směru, bude pro anodový proud přibližně platit třípolovinový zákon

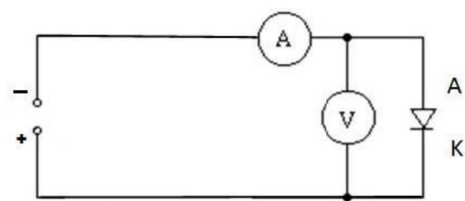
$$I = aU^{3/2} \quad (2)$$

kde  $a$  je konstanta daná geometrickým uspořádáním elektrod. Anodový proud se s rostoucím napětím zvyšuje až do hodnoty rovné emisnímu proudu (1), po překročení této hodnoty buď začne procházet nasycený proud, nebo dojde ke zvýšení emisního proudu v závislosti na materiálu katody.

Pro změření voltampérové charakteristiky vakuové diody v propustném směru zapojíme obvod podle obrázku 1 a pro měření závěrné oblasti zapojíme obvod podle obrázku 2. Obvody se liší pouze polaritou zdroje. V tomto zapojení je důležité použít voltmetr s vysokým vnitřním odporem, neboť odpor diody nabývá v závěrném směru značných hodnot.



Obrázek 1: Schéma zapojení pro měření propustné oblasti charakteristiky

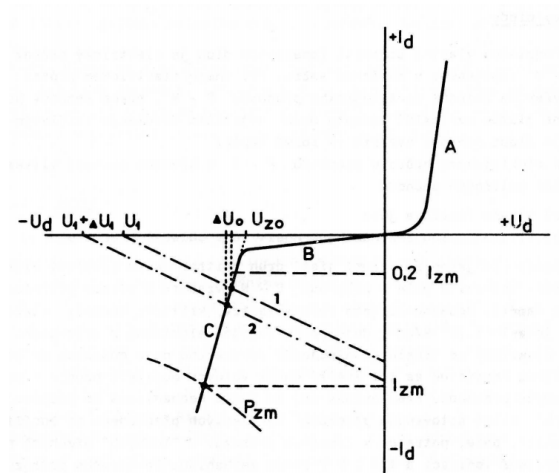


Obrázek 2: Schéma zapojení pro měření závěrné oblasti charakteristiky

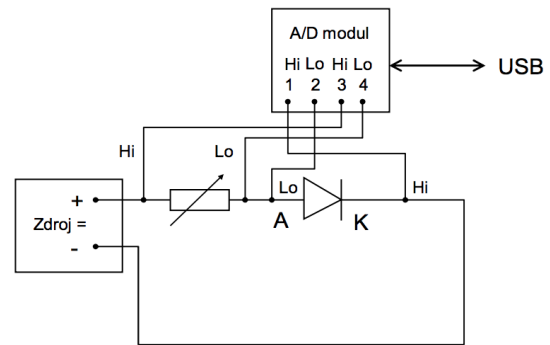
### 2.2 Zenerova dioda

Zenerova dioda je speciální polovodičová dioda, která se nezničí pokud ji zapojíme v závěrném směru a dojde k průrazu P-N přechodu. Typická voltampérová charakteristika Zenerovy diody je zobrazena na obrázku 3. V propustném směru je obdobná propustné části obyčejných usměrňovacích diod. V závěrné části má Zenerova dioda velký vnitřní odpor a protéká jí malý proud, dokud napětí nedosáhne hodnoty  $U_Z$ , tzv. Zenerova napětí. Při překročení této hodnoty klesne odpor diody a začne jí protékat značný proud. V této průrazné části charakteristiky je závislost proudu na napětí přibližně lineární.

Voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody změříme pomocí A-D převodníku a hodnoty zaznamenejeme pomocí počítače. Obvod pro měření zapojíme dle obrázku 4.



Obrázek 3: Typický průběh V-A charakteristiky Zenerovy diody



Obrázek 4: Schéma zapojení pro měření V-A charakteristiky Zenerovy diody

### 2.3 Stabilizátor

Zenerovy diody se nejčastěji používají ke stabilizaci napětí. Pro stabilizaci stejnosměrného napětí zapojíme obvod podle obrázku 5. Aby mohl stabilizátor fungovat, musí platit, že vstupní napětí  $U_1$  je větší než Zenerovo napětí  $U_Z$  a odpor  $R_S$  musí být zvolen tak, aby zatěžovací přímka protínala V-A charakteristiku Zenerovy diody v průrazné oblasti. Změna vstupního napětí  $\Delta U_1$  pak vede na malou změnu výstupního napětí  $\Delta U_0$ .

Vlastnost stabilizačního proudu se popisuje stabilizačním činitelem  $S_u$ , který je definován [1]

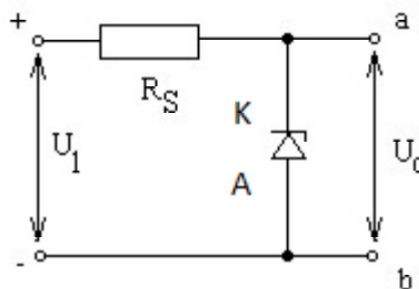
$$S_u = \frac{U_0 \Delta U_1}{U_1 \Delta U_0} \tag{3}$$

Pokud zavedeme dynamický vnitřní odpor  $r_i$  výrazem

$$r_i = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \tag{4}$$

je možné vyjádřit změnu vstupního napětí jako  $\Delta U_1 = R_S \Delta I + \Delta I r_i$  a změnu výstupního napětí  $\Delta U_0 = \Delta I r_i$ . Pro stabilizační činitel pak platí

$$S_u = \frac{U_0 (R_S + r_i)}{U_1 r_i} \approx \frac{U_Z (R_S + r_i)}{U_1 r_i} \tag{5}$$



Obrázek 5: Obvod pro stabilizaci stejnosměrného napětí

### 3 Výsledky měření

#### 3.1 Vakuová dioda

Obvod pro měření voltampérové charakteristiky vakuové diody v propustném směru byl zapojen podle obrázku 1. Pro měření napětí na vakuové diodě byl použit multimetr Mastech MY-65 a pro měření proudu multimetr METEX M-3270D. Přesnosti použitých multimetrů jsou uvedené v tabulkách 1 a 2. Pro měření byl použit vždy nejmenší možný rozsah.

Tabulka 1: Multimetr Mastech MY-65

rozsah	přesnost
200 mV	0,05% + 3 dg
2 V	0,1% + 3 dg
20 V	0,1% + 3 dg
200 V	0,1% + 3 dg

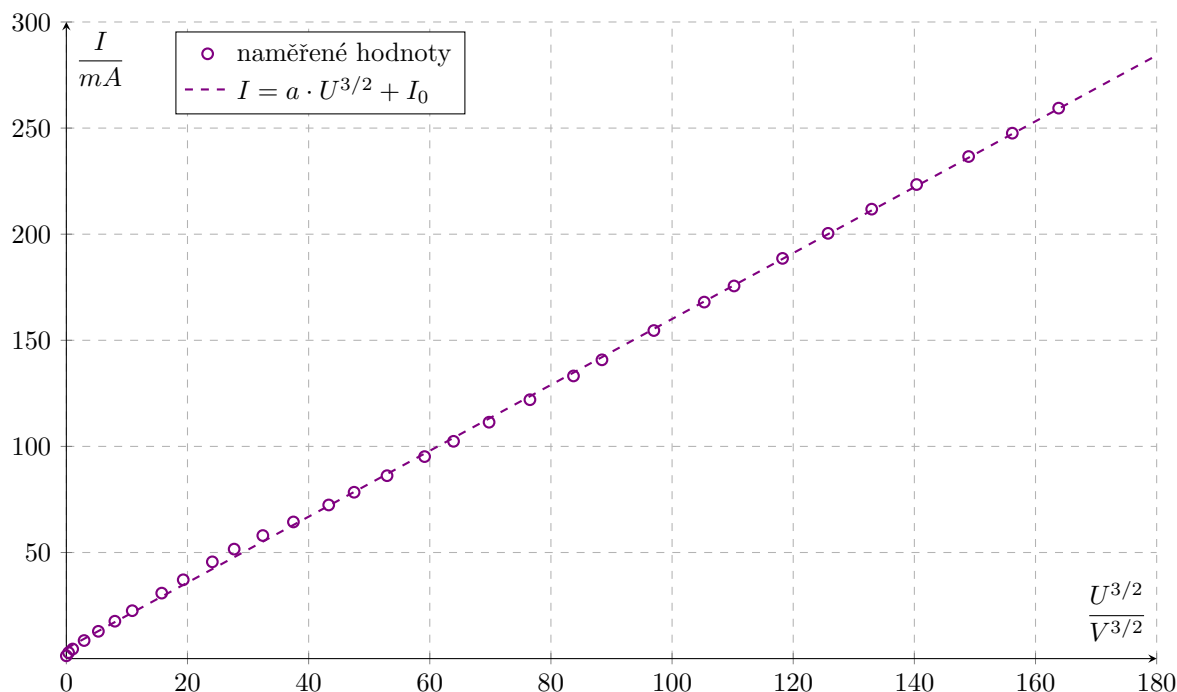
Tabulka 2: Multimetr METEX M-3270D

rozsah	přesnost
400 $\mu A$	0,8% + 2 dg
4 mA	1,2% + 2 dg
40 mA	1,2% + 2 dg
400 A	1,2% + 2 dg

Naměřené hodnoty proudů a napětí společně s chybami měření počítané z přesností použitých přístrojů jsou uvedené v tabulce 3. Pro ověření třípolovinového zákona (2) byla také vypočítaná hodnota  $U^{3/2}$  a její chyba dle zákona šíření chyb

$$\sigma_{U^{3/2}} = \frac{3}{2} \sqrt{U} \sigma_U \quad (6)$$

Naměřenými hodnotami byla proložena přímka ve tvaru  $I = a \cdot U^{3/2} + I_0$ , kde koeficienty  $a$ ,  $I_0$  byly určeny podle standardních vzorců lineární regrese [2]. Číselně vyšly hodnoty  $a = (1,553 \pm 0,006) \text{ mA} \cdot \text{V}^{-3/2}$ ,  $I_0 = (4,8 \pm 0,5) \text{ mA}$ . Naměřené hodnoty společně s proloženou přímkou jsou zobrazeny v grafu 1.



Graf 1: Voltampérová charakteristika vakuové diody v propustném směru

Tabulka 3: Voltampérová charakteristika vakuové diody v propustném směru

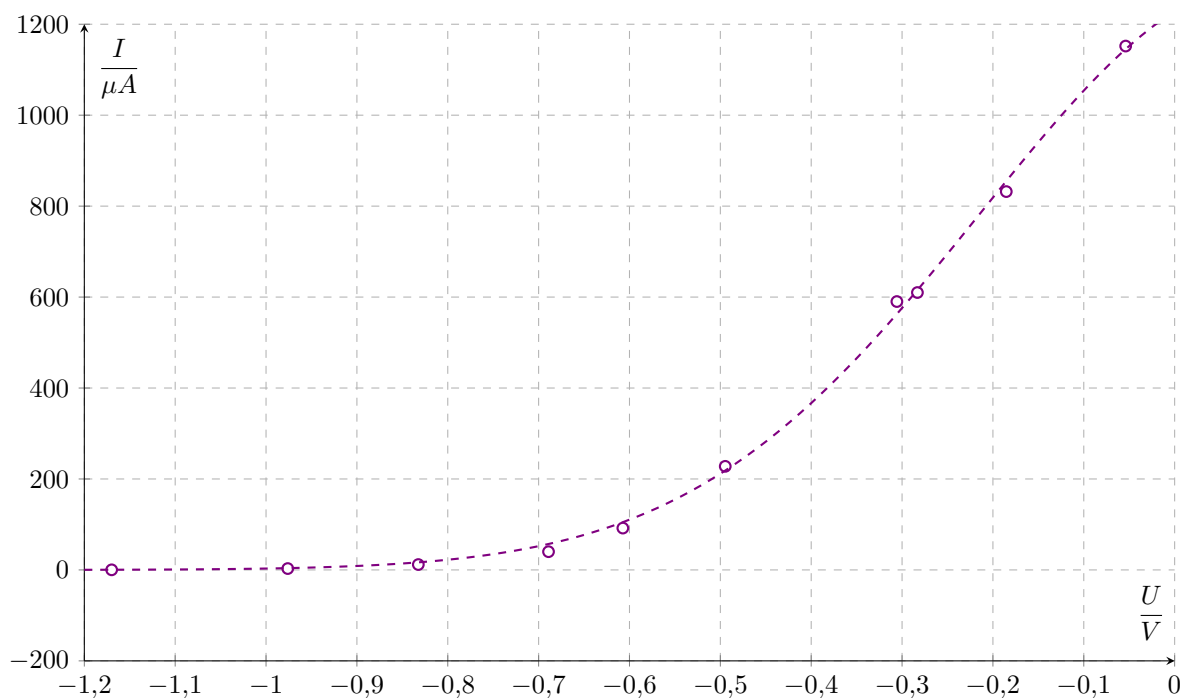
$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{mA}$	$\frac{\sigma_I}{mA}$	$\frac{U^{3/2}}{V^{3/2}}$	$\frac{\sigma_{U^{3/2}}}{V^{3/2}}$
0,0105	0,0003	1,32	0,02	0,00108	0,00005
0,5173	0,0008	2,84	0,04	0,3721	0,0009
1,029	0,001	4,52	0,07	1,044	0,002
2,049	0,005	8,5	0,1	2,93	0,01
3,035	0,006	12,9	0,2	5,29	0,02
4,004	0,007	17,6	0,2	8,01	0,02
4,910	0,008	22,6	0,3	10,88	0,03
6,283	0,009	30,9	0,4	15,75	0,03
7,20	0,01	37,1	0,5	19,30	0,04
8,34	0,01	45,6	0,7	24,10	0,05
9,16	0,01	51,6	0,8	27,71	0,06
10,17	0,01	58,0	0,9	32,44	0,06
11,20	0,01	64	1	37,49	0,07
12,33	0,02	72	1	43,32	0,08
13,12	0,02	78	1	47,51	0,09
14,10	0,02	86	1	52,9	0,1
15,18	0,02	95	1	59,1	0,1
15,99	0,02	102	1	63,9	0,1
16,95	0,02	111	2	69,8	0,1
18,03	0,02	122	2	76,5	0,1
19,14	0,02	133	2	83,7	0,1
19,85	0,02	141	2	88,4	0,2
21,11	0,05	155	2	97,0	0,4
22,30	0,05	168	2	105,3	0,4
22,99	0,05	176	2	110,2	0,4
24,09	0,05	189	2	118,2	0,4
25,10	0,06	200	3	125,8	0,4
26,05	0,06	212	3	133,0	0,4
27,01	0,06	223	3	140,4	0,4
28,10	0,06	237	3	149,0	0,5
29,00	0,06	248	3	156,2	0,5
29,94	0,06	259	3	163,8	0,5

Pro proměření závěrné části charakteristiky byl obvod přepojen podle obrázku 2. Použil jsem stejné multimetry. Naměřené hodnoty jsou uvedené v tabulce 4 a jsou znázorněny graficky v grafu 2. Proložená křivka je zde pouze orientační a nebyla použita k dalším výpočtům.

První tři hodnoty uvedené v tabulce 4 jsou hodnoty naměřené v propustném směru, pro které jsem naměřil záporné napětí mezi elektrodami, ale pro přehlednost jsem je zahrnul k hodnotám ze závěrného směru.

Tabulka 4: Voltampérová charakteristika vakuové diody v závěrném směru

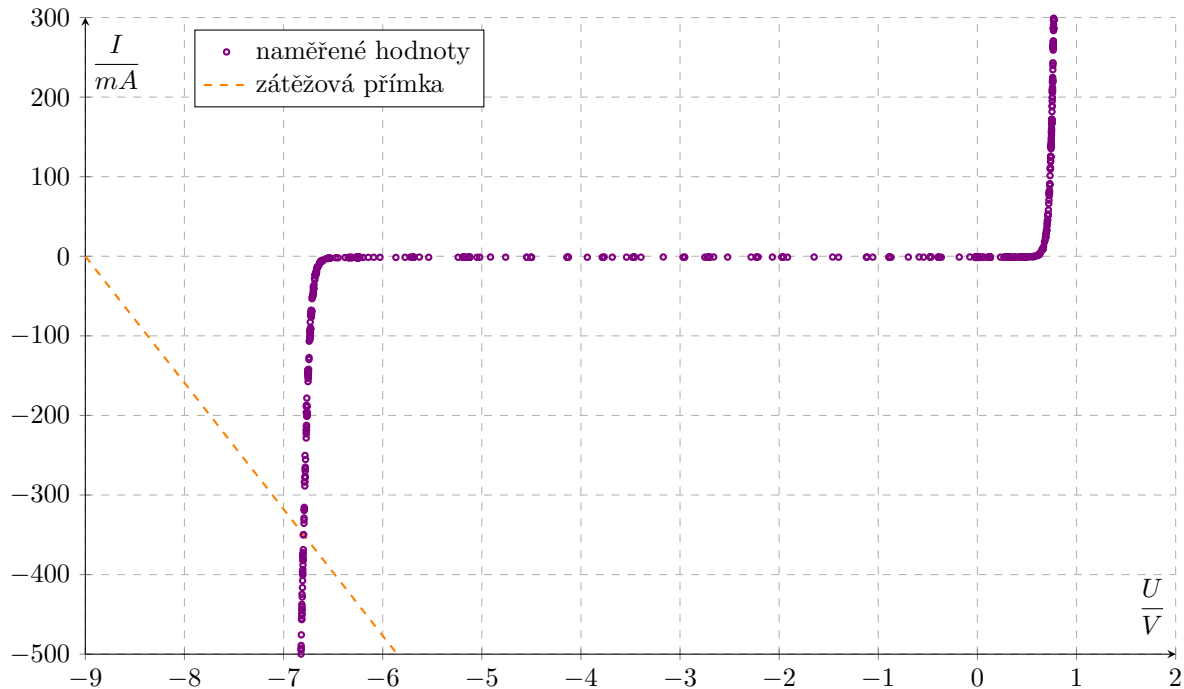
$\frac{U}{V}$	$\frac{\sigma_U}{V}$	$\frac{I}{\mu A}$	$\frac{\sigma_I}{\mu A}$
-0,0539	0,0004	1152	16
-0,1853	0,0005	832	12
-0,2831	0,0006	610	9
-0,3057	0,0006	590	9
-0,4946	0,0008	228	2
-0,6073	0,0009	92,0	0,9
-0,689	0,001	40,1	0,5
-0,832	0,001	11,8	0,3
-0,976	0,001	3,0	0,2
-1,170	0,001	0,2	0,2



Graf 2: Voltampérová charakteristika vakuové diody v závěrném směru

### 3.2 Zenerova dioda

Obvod pro měření V-A charakteristiky Zenerovy diody byl zapojen podle obrázku 3. Měření jsem provedl najednou pro propustný i závěrný směr pomocí převodníku UDAQ-1408E. Hodnoty proudu a napětí byly v pravidelných časových intervalech zaznamenávány počítačem a celkem bylo naměřeno 1000 hodnot. V propustném směru jsem měřil do hodnot  $300 \text{ mA}$  a v závěrném směru do  $-500 \text{ mA}$ . Změřená charakteristika je vidět v grafu 3. V grafu je také znázorněna zátěžová přímka pro napětí zdroje  $U_1 = -9 \text{ V}$  a proud  $I = -350 \text{ mA}$ , která byla použita k určení  $R_S$  v obvodu stabilizátoru. Vzhledem k objemu dat zde neuvádím tabulku naměřených hodnot.



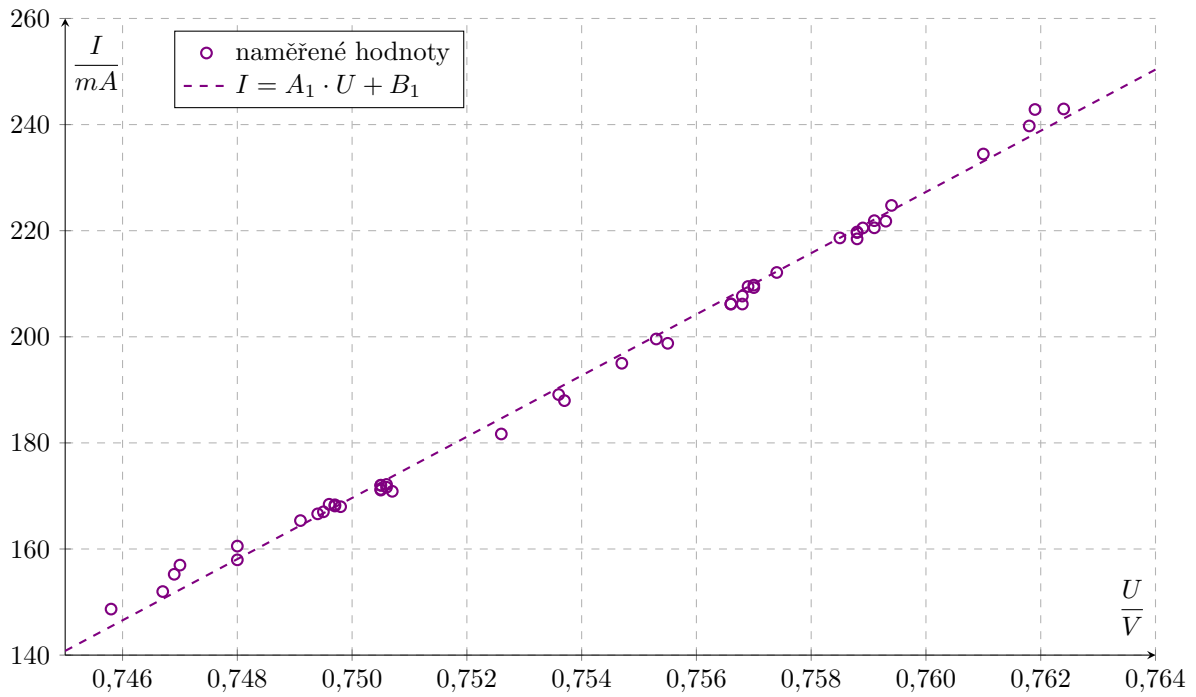
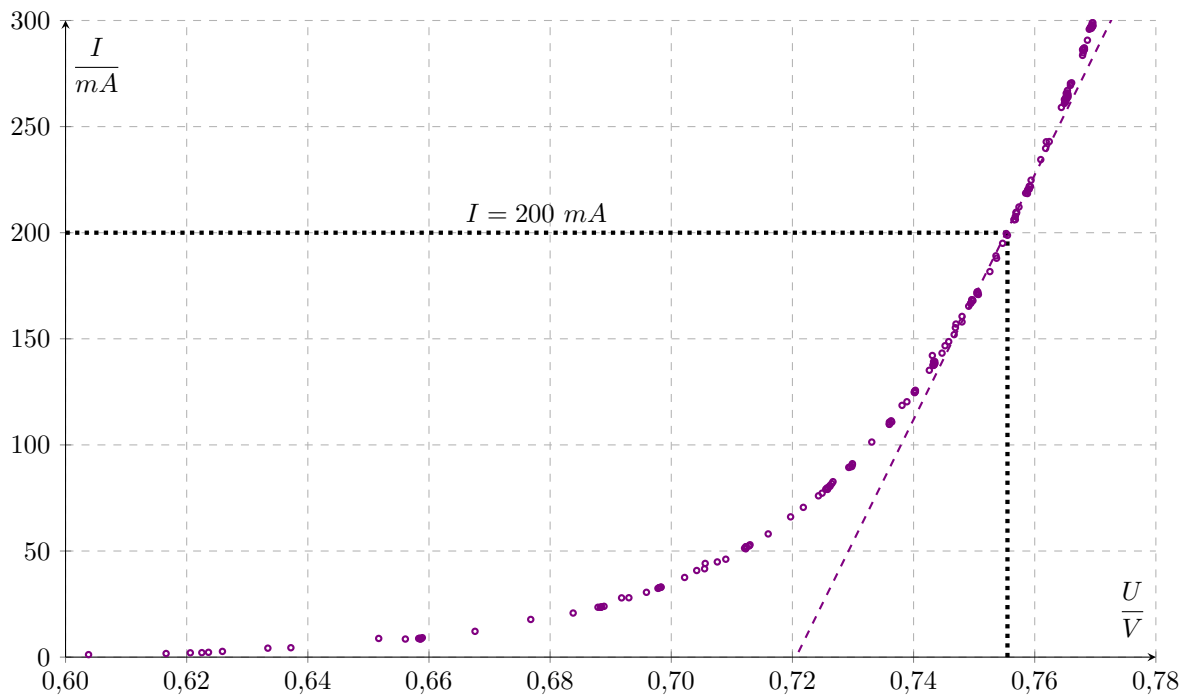
Graf 3: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody

Pro určení dynamického odporu v propustném směru při proudu  $200 \text{ mA}$  jsem pracoval s naměřenými hodnotami z intervalu  $150 \text{ mA}$  až  $250 \text{ mA}$ , na kterém je V-A charakteristika Zenerovy diody přibližně lineární. Naměřenými hodnotami byla proložena přímka ve tvaru  $I = A_1 U + B_1$ . Koeficienty  $A_1$ ,  $B_1$  byly určeny lineární regresí  $A_1 = (5,77 \pm 0,06) \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$  a  $B_1 = (-4,16 \pm 0,05) \text{ A}$ . Hodnoty použité k lineární regresi společně s proloženou přímkou jsou zobrazeny v grafu 4.

Vnitřní dynamický odpor pak byl určen podle (4) jako  $r_1 = 1/A$  a jeho chyba ze zákona šíření chyb

$$\sigma_{r_1} = \frac{\sigma_A}{A^2} \quad (7)$$

Vyšla mi tak hodnota  $r_1 = (0,173 \pm 0,002) \Omega$ . Detail V-A charakteristiky Zenerovy diody v propustném směru zobrazuje graf 5. Je zde uvedena také proložená přímka  $I = A_1 \cdot U + B_1$  a vyznačen bod na charakteristice  $I = 200 \text{ mA}$ , pro který byl určen vnitřní dynamický odpor.

Graf 4: Určení dynamického vnitřního odporu  $r_i$  pro proud  $+200\text{ mA}$ 

Graf 5: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody v propustném směru

Podobně jsem postupoval v závěrném směru. Z naměřených hodnot jsem vybral ty ležící v intervalu od  $-500 \text{ mA}$  do  $-300 \text{ mA}$ , na kterém je V-A charakteristika přibližně lineární a data jsem proložil přímkou ve tvaru  $I = A_2U + B_2$ . Vyšly hodnoty  $A_2 = (5,60 \pm 0,05) \text{ A} \cdot \text{V}^{-1}$  a  $B_2 = (37,7 \pm 0,8) \text{ A}$ . Hodnoty použité k lineární regresi společně s proloženou přímkou jsou zobrazeny v grafu 6.

Dynamický vnitřní odpor diody v závěrném směru pro proud  $400 \text{ mA}$  pak byl určen jako  $r_2 = 1/A_2$  a jeho chyba podle (7). Dostal jsem tak  $r_2 = (0,178 \pm 0,004) \Omega$ .

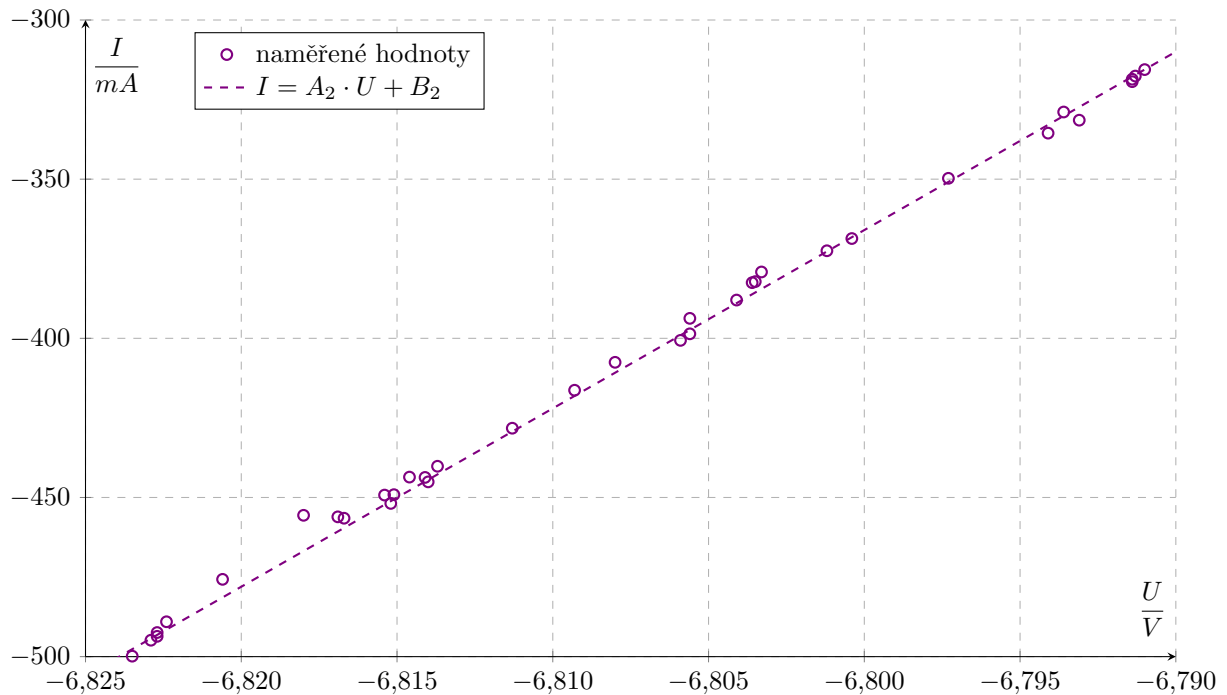
Zenerovo napětí jsem určil z proložené přímky jako průsečík s osou x, tedy  $U_Z = -B_2/A_2$  a jeho chybu ze zákona šíření chyb

$$\sigma_{U_Z} = \frac{B_2}{A_2} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{B_2}}{B_2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{A_2}}{A_2}\right)^2} \quad (8)$$

Číselně vyšlo  $U_Z = -(6,74 \pm 0,02) \text{ V}$ . Odpor  $R_S$  odpovídající zatěžovací přímce pro napětí zdroje  $U_1 = -9 \text{ V}$  a proud tekoucí diodou  $I_S = -350 \text{ mA}$  je dán vztahem

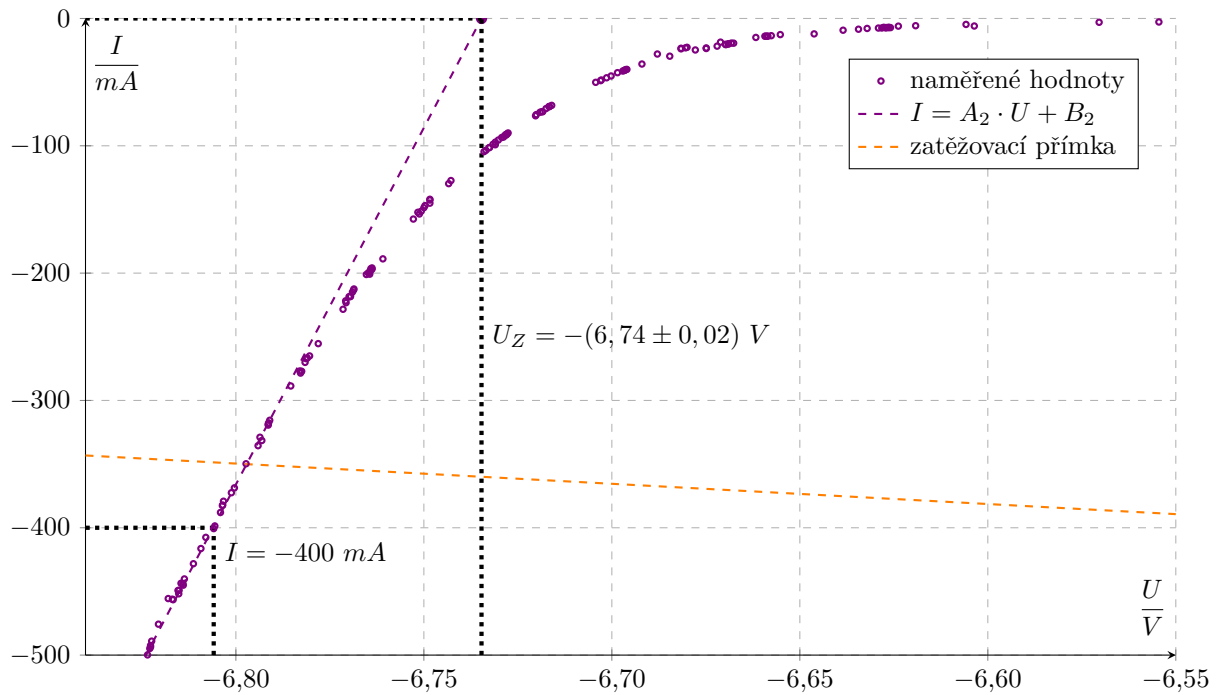
$$R_S = \frac{U_Z - U_1}{I_S} \quad (9)$$

Vyšlo mi  $R_S = (6,5 \pm 0,1) \Omega$ . Detail V-A charakteristiky v závěrném směru společně s proloženou přímkou  $I = A_2U + B_2$  a zatěžovací přímkou je zobrazen v grafu 7.



Graf 6: Určení Zenerova napětí  $U_Z$  a dynamického vnitřního odporu  $r_i$  pro proud  $-400 \text{ mA}$





Graf 7: Voltampérová charakteristika Zenerovy diody v závěrném směru

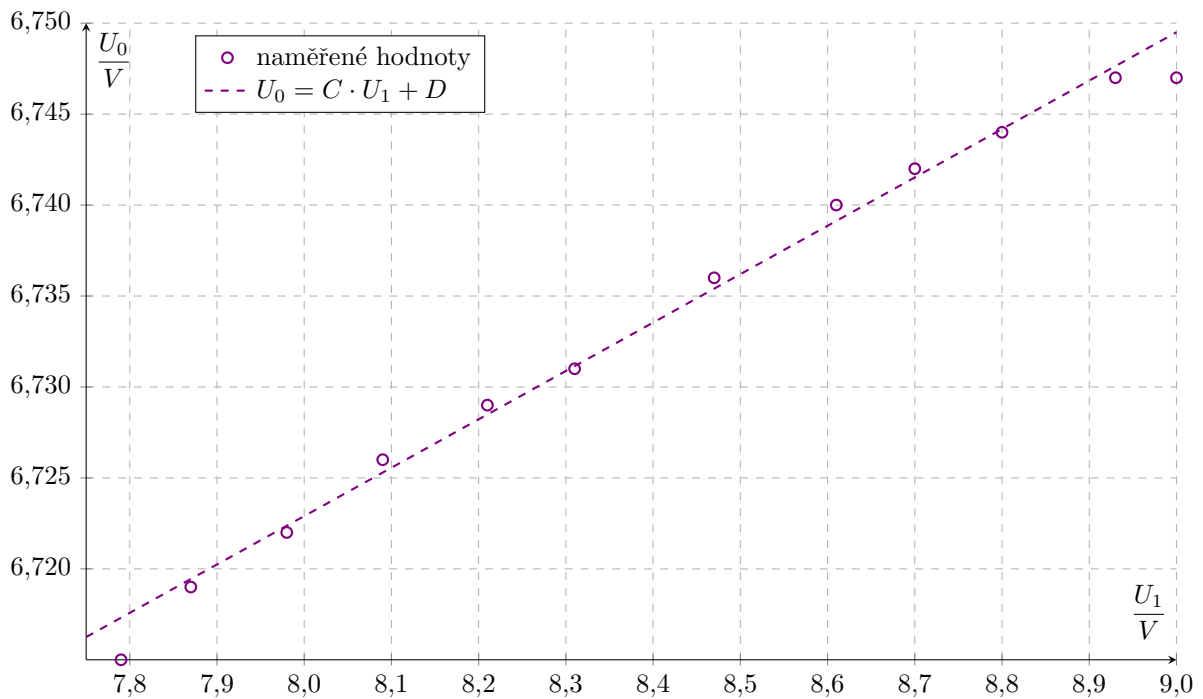
### 3.3 Stabilizátor

Obvod stabilizátoru byl sestaven podle obrázku 5 a na odporové dekádě byl nastaven odpor  $R_S = 6,5 \Omega$ . Pro měření napětí na diodě byl použit multimetr Mastech MY-65, jehož přesnost je uvedena v tabulce 1 a pro měření vstupního napětí byl použit multimetr METEX M-3270D, který má při rozsahu  $40 V$  přesnost  $\pm 0,8\% + 2 \text{ dig}$ . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.

Naměřenými hodnotami byla proložena přímka ve tvaru  $U_0 = C \cdot U_1 + D$ . Z lineární regrese vyšlo  $C = (0,0266 \pm 0,0008)$  a  $D = (6,510 \pm 0,007) V$ . Naměřené hodnoty s proloženou přímkou zobrazuje graf 8. Podle (5) jsem pak určil stabilizační činitel pro napětí  $U_1 = -9 V$  na hodnotu  $S_u = (28 \pm 1)$ .

Tabulka 5: Ověření funkce stabilizátoru

$\frac{U_1}{V}$	$\frac{\sigma_{U_1}}{V}$	$\frac{U_0}{V}$	$\frac{\sigma_{U_0}}{V}$
7,79	0,08	6,715	0,010
7,87	0,08	6,719	0,010
7,98	0,08	6,722	0,010
8,09	0,08	6,726	0,010
8,21	0,09	6,729	0,010
8,31	0,09	6,731	0,010
8,47	0,09	6,736	0,010
8,61	0,09	6,740	0,010
8,70	0,09	6,742	0,010
8,80	0,09	6,744	0,010
8,93	0,09	6,747	0,010
9,00	0,09	6,747	0,010



Graf 8: Ověření funkce stabilizátoru

## 4 Diskuse

Během měření voltampérové charakteristiky vakuové diody jsem zanedbal proud protékající voltmetrem, ovšem jelikož je vnitřní odpor použitého voltmetru řádově  $1\text{ M}\Omega$  a přiložené napětí řádově  $1\text{ V}$  v závěrném směru, resp.  $10\text{ V}$  v propustném směru, tak je proud protékající voltmetrem roven řádově  $1\text{ }\mu\text{A}$ , resp.  $10\text{ }\mu\text{A}$ . V propustném směru je toto zanedbání zřejmě nepodstatné. V závěrném směru bychom správně měli provádět korekci, aspoň pro hodnoty napětí  $U < -1,0\text{ V}$ , ovšem daná korekce by výrazně neovlivnila změřený průběh charakteristiky a jelikož jsem hodnoty v závěrném směru nepoužil k dalším výpočtům, tak nebylo nutné korekci provádět.

Změřená charakteristika vakuové diody odpovídá teoretickým předpokladům. Při nulovém napětí ze zdroje byl mezi elektrodami změřen malý proud, řádově  $1\text{ mA}$ . Při zapojení v závěrném směru se tento proud dále zmenšoval a pro napětí  $-1,17$  byl již protékající proud menší než chyba měřícího přístroje. V propustném směru V-A charakteristika dobře splňuje třípolovinový zákon daný rovnicí (2), jak je vidět z grafu 1, ovšem celá přímka je posunutá v kladném směru osy  $y$  o hodnotu  $I_0$ , což odpovídá tomu, že diodou prochází proud i při nulovém napětí. Hodnota  $I_0$  určená z lineární regrese je přibližně pět krát větší než hodnota proudu naměřená pro napětí blízké nule. To bylo pravděpodobně způsobeno tím, že třípolovinový zákon platí pouze přibližně - platí dobře pro velké proudy, jak je vidět z grafu 1, ale hůře v okolí nuly.

Průběh voltampérové charakteristiky Zenerovy diody měl také očekávaný průběh, což můžeme vidět když porovnáme graf 3 a obrázek 3. Dynamické vnitřní odpory pro proudy  $+200\text{ mA}$  a  $-400\text{ mA}$  byly určeny z intervalu hodnot, kde byla charakteristika přibližně lineární. V propustném směru to znamenalo, že jsem musel vybrat menší interval, neboť již v intervalu  $100$  až  $300\text{ mA}$  bylo patrné značné zakřivení charakteristiky. Z grafů 4 a 6 je však možné vidět, že na zvolených intervalech  $150\text{ mA}$  až  $250\text{ mA}$  a  $-500\text{ mA}$  až  $-400\text{ mA}$  jsou změřené závislosti dostatečně přesně lineární.

Z grafu 8 je patrné, že použitá Zenerova dioda zapojená v obvodu podle obrázku 5 pracuje dobře jako stabilizátor stejnosměrného proudu. Ze změřených hodnot v tabulce 5 vidíme, že změně vstupního napětí řádově o  $1\text{ V}$  odpovídá změna napětí na diodě v řádu  $0,01\text{ V}$ .

## 5 Závěr

Byla proměřena voltampérová charakteristika pro vakuovou diodu EZ 81 a Zenerovu diodu KZ 703. Pro Zenerovu diodu byl určen její dynamický vnitřní odpor v propustném směru při proudu  $200\text{ mA}$  na hodnotu  $r_1 = (0,173 \pm 0,002)\text{ }\Omega$  a v závěrném směru pro proud  $400\text{ mA}$  na hodnotu  $r_2 = (0,178 \pm 0,004)\text{ }\Omega$ . Zenerovo napětí pro danou diodu je rovno  $U_Z = -(6,74 \pm 0,02)\text{ V}$ . Byla také ověřena funkce stabilizátoru stejnosměrného napětí a stabilizační činitel pro vstupní napětí  $-9\text{ V}$  vyšel  $S_u = (28 \pm 1)$ .

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Charakteristiky diod. Fyzikální praktikum [online]. [cit. 24-11-2018]. [https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/\\_media/zadani/texty/txt\\_211.pdf](https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_211.pdf)
- [2] English, Jiří. Úvod do praktické fyziky I. 1. vyd. Praha: MATFYYPRESS, 2006, 145 s.