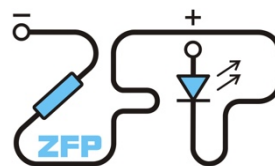


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II.



Úloha č. 11.

Název úlohy: Charakteristiky diod

Jméno: Jan Hrabovský

Obor: FOF

Datum měření: 15.10.2018

Datum odevzdání:

Připomínky 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	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:

dne:

11 – Charakteristiky diod

Základní fyzikální praktikum (Fyzikální praktikum II. OF)

Vypracoval: Jan Hrabovský

UKČO: 61088176

Datum měření: 15.10.2018

Pracovní úkoly:

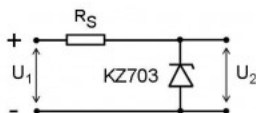
1. Změřte voltampérovou charakteristiku vakuové diody (EZ 81) bod po bodu
2. Změřte voltampérovou charakteristiku Zenerovy diody (KZ 703) pomocí převodníku UDAQ-1408E
3. Pro Zenerovu diodu určete její dynamický vnitřní odpor v propustném směru při proudu 200 mA a v závěrném směru pro proud 400 mA
4. Určete odpovídající Zenerovo napětí U_Z
5. Zakreslete do V-A charakteristiky zatěžovací přímku pro napětí zdroje $U_1 = -9V$ a proud tekoucí diodou $I = -350$ mA
6. Sestavte stabilizátor napětí a ověřte jeho funkci

V rámci měření je nutné sledovat mezní parametry proměřovaných součástek:

Vakuová dioda (EZ81): v propustném směru nepřekročit 30 V

Zenerova dioda (KZ 703): v propustném směru nepřekročit 300 mA

Stabilizátor napětí: KZ703, nepřekročit -500 mA, napětí U_1 -12 V, R_S použít odpovídající zatěžovací přímce



Teoretická část:

Mezi nejjednodušší elektronkové součástky patří vakuová dioda. Součástka je tvořena baňkou (zpravidla válcového tvaru), ve které je umístěna anoda a katoda. Žhavicí vlákno je často v rámci konstrukce diody ztotožněno s katodou, ze které jsou termoemisí uvolňovány elektrony. V případě přiložení kladného potenciálu na anodu jsou následně elektrony urychlovány právě k anodě a diodou začne procházet anodový proud I_a , který lze vyjádřit jako (1), kde U_a je anodové napětí a a konstanta závislá na geometrii vnitřního uspořádání^[1,2].

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

Při obrácené polaritě dochází k tvorbě elektronového oblaku v okolí katody, který část elektronů vrací zpět na katodu. Pouze elektrony s dostatečně velkou energií (rychlostí) se mohou dostat na anodu (musí dojít k překročení tzv. potenciálové bariéry). Toto je příčinou pozorovaného proudu ($10^{-5} - 10^{-4}$ A) i při nulovém přiloženém napětí. Při zvyšování záporného napětí anody dochází k rychlému vymizení tohoto proudu. Tento směr je následně označován jako závěrný směr diody^[1,2].

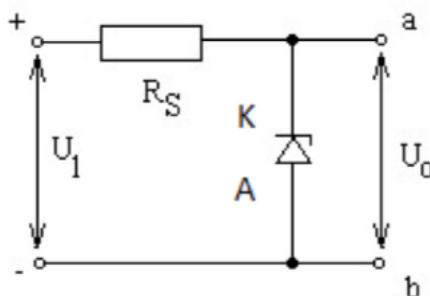
Oproti výše uvedeným elektronkovým součástkám jsou polovodičové diody konstruovány na principu PN přechodu mezi dvěma stranami materiálu. Části polovodičového materiálu mohou být tvořeny například křemíkem, který je v případě P

orientace dopovaný elektrodeficitními prvky (III. A skupina) a v případě N orientace prvky s nadbytkem elektronů (V.A skupina) oproti hostitelskému materiálu. Spojením těchto dvou částí dojde ke vzniku PN přechodu, na jehož rozhraní vznikne hradlová vrstva, kde směr směřování elektrického pole je nastaven ve směru od N typu k p typu polovodiče. Připojením P části se záporným polem a N části s kladným polem v obvodu dojde k nárůstu hradlové vrstvy (nárůst spádu potenciálu) a znatelnému poklesu průchozího proudu prakticky na nulu. Tomuto zapojení říkáme zapojení v nepropustném směru. V opačném případě zapojení polovodičem proud prochází a zapojení se označuje jako zapojení v propustném směru. Usměrňovací schopnost polovodičových diod lze charakterizovat pomocí usměrňovacího poměru η , který je definován jako poměr proudu v propustném (I_P) a závěrném směru (I_Z) při konstantní hodnotě napětí na usměrňovači (2). Běžné hodnoty usměrňovacího poměru se pohybují v rozmezích od 10^3 až do 10^8 . Hodnota usměrňovacího poměru je závislostí teploty a s rostoucí teplotou klesá, jelikož roste rychleji roste hodnota závěrného proudu. Při vyšších teplotách může dojít až k poškození diody. Z tohoto důvodu se využívá v dnešní době především křemík a další materiály, které mohou pracovat až do teplot okolo 100°C [1,2].

$$\eta = I_P/I_Z \quad (2)$$

V případě zapojení diody (polovodič s PN přechodem) v závěrném směru může dojít při překročení průrazného napětí opět k průchodu proudu součástkou. Pokud je tento jev vratný, tzn. při opětovném snížení napětí dojde k nárůstu odporu a snížení průchozího proudu a součástka není poškozena, jedná se o speciální typ tzv. Zenerovy diody a toto průrazné napětí označujeme jako Zenerovo napětí U_Z . K tomuto pozorování dochází díky tzv. Zenerovu jevu v kombinaci s lavinovým násobením nositelů náboje v oblasti PN přechodu.

V případě Zenerova jevu dochází ke zvýšení intenzity elektrického pole na PN přechodu s růstem závěrného napětí. Při dosažení kritické hodnoty dojde k vytrhávání elektronů z valenčních pásů a dochází k nárůstu vodivosti. V kombinaci s lavinovým efektem, kdy jsou elektrony urychlovány v elektrickém poli dostatečné intenzity (menší než kritická hodnota intenzity pro Zenerův jev) získávají dostatečnou energii k uvolnění dalšího valenčního elektronu. Tímto dojde ke vzniku páru elektron-díra, který může být znovu urychlen a opakovaně umožnit vznik dalších volných nositelů náboje [1,2].



Obr.1. Obvod pro stabilizaci stejnosměrného napětí

Zenerovy diody lze úspěšně implementovat ve stabilizačních obvodech napětí (Obr.1). Obvod plní funkci stabilizátoru v případě, pokud je vstupní napětí U_1 větší než zenerovo napětí U_Z a pokud odpor R_S je zvolen tak, aby zatěžovací přímka protínala graf voltampérové charakteristiky v části, které odpovídá průrazu (7). Dále je pak zaveden stabilizační činitel S_u jako poměr reaktivní změny vstupního napětí U_1 na relativní změně

vstupního napětí U_0 (3) a reprezentuje kvalitu stabilizace. Čím je jeho hodnota vyšší, tím méně je výstupní napětí závislé na vstupním napětí^[1,2].

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

Vnitřní odpor r_i je následně definován jako (4), který určuje závislost výstupního napětí ΔU_0 na odebíraném proudu ΔI_0 .

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

Jelikož je změna napětí na zdroji reprezentována výrazem $\Delta U_1 = R_S \Delta I + \Delta I r_i$, můžeme kombinací předchozího odvodit vztah pro stabilizační činitel jako (5). V případě, kdy $r_i \ll R_S$ a $U_Z \ll U_1$, lze stabilizační činitel v pracovním (I_Z) bodě přibližně vyjádřit vztahem (6). Splnění prvního předpokladu je prakticky snadno realizovatelná, druhý předpoklad platí pouze při velmi vysokých napětích^[1,2].

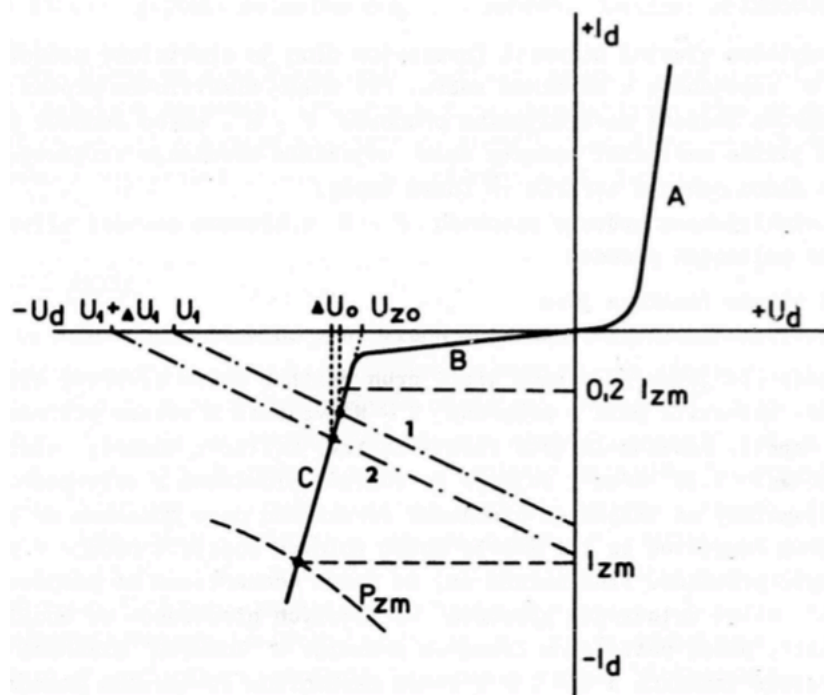
$$S_u = \frac{U_0}{U_1} \frac{(R_S + r_i) \Delta I}{r_i \Delta I} = \frac{U_0 (R_S + r_i)}{U_1 r_i} \quad (5)$$

$$S_u = \frac{U_{Z0}}{I_Z r_i} \quad (6)$$

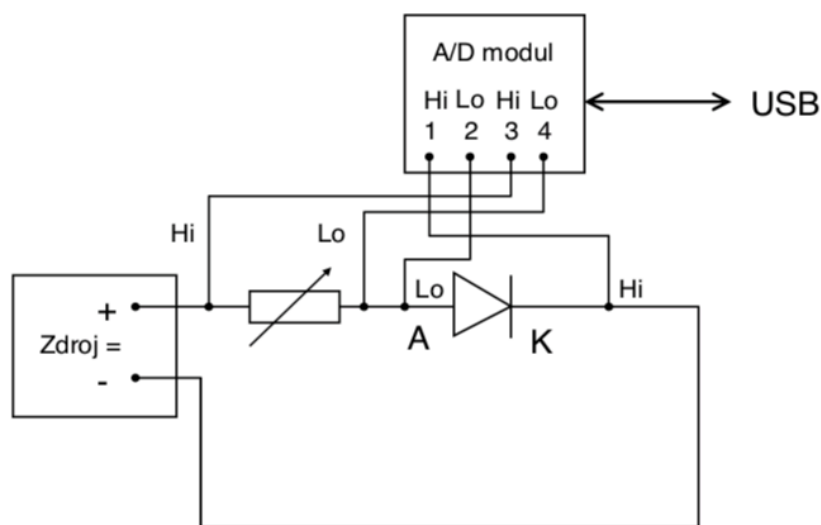
Závislost proudu stabilizačním obvodem na napětí na diodě je známa jako zátěžová přímka, pro kterou platí (7)

$$R_S = \frac{U_1 - U_Z}{I_S} \quad (7)$$

Vzorová Voltampérová charakteristika Zenerovy diody je znázorněna na Obr.2. schéma jejího zapojení v obvodu s převodníkem na Obr.3.



Obr.2. Charakteristika Zenerovy diody ^[1]



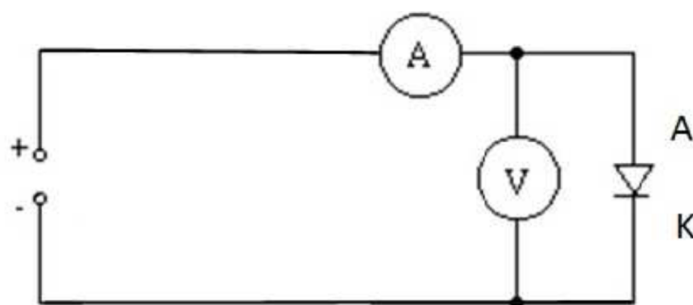
Obr.3. Schéma zapojení Zenerovy diody do obvodu s A-D převodníkem ^[1]

Experimentální část:

K měření napětí byly použity dva digitální multimetry MY-65 v nastavení DC 20 V (rozlišení $1 \text{ mV} \pm (0,1\% \pm 3 \text{ dg})$) a DC 20 mA (rozlišení $1 \mu\text{A} \pm (0,5\% \pm 5 \text{ dg})$), DC 200 mA (rozlišení $10 \mu\text{A} \pm (0,5\% \pm 5 \text{ dg})$). Dále byla použita odporová dekáda značky METRA XL6 (nebyla brána v úvahu pro výpočet chyb měření), trafo s označením 6,5 V (220 V), vakuová dioda EZ 81 (žhavení 6,3 V) a Zenerova dioda KZ 703. V případě měření s převodníkem byl použit laboratorní zdroj MATRIX model: MPS-3003L a převodník UDAQ-140E (14-bit). Okolní laboratorní podmínky jako tlak, teplota a vlhkost nebyly v rámci zjištěných chyb měření uvažovány. Chyba při přepočtech byla počítána standardní metodou přenosu chyb dle typu použitého vzorce k výpočtu ^[1,3].

V první části měření byla sledována voltampérová charakteristika vakuové diody EZ81, pro kterou byla dle zadání měřena voltampérová charakteristika (V-A charakteristika) manuálně v propustném směru bod po bodu dle zapojení na Obr. 4^[1]. Záznam měření je uveden v Tab.1. a vynesena do grafu (Graf.1.) při předpokladu platnosti vztahu (1) byla následně vynesena i závislost $I \sim U^{3/2}$ pro kladné hodnoty naměřeného napětí (Graf.2.).

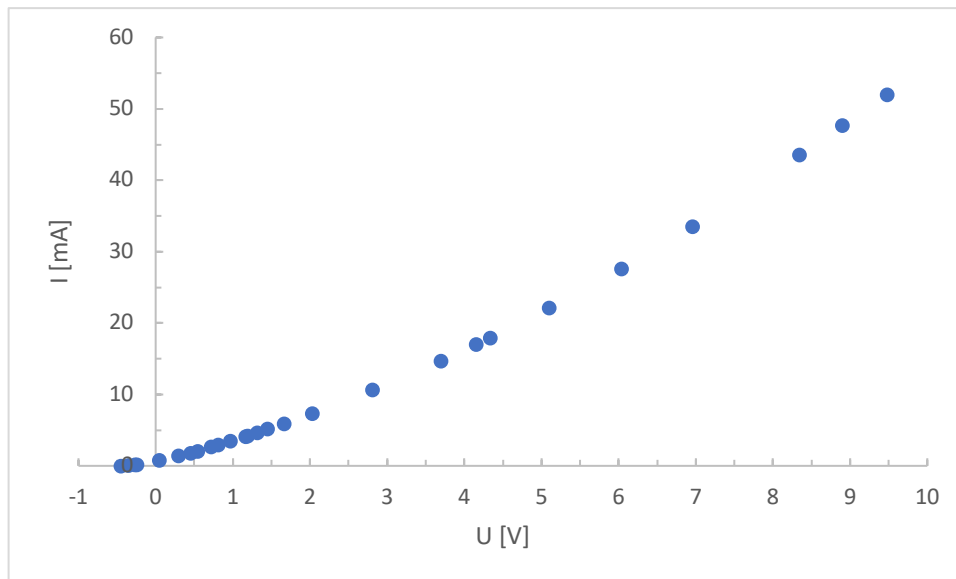
Takto získaná závislost byla následně proložena lineární přímkou procházející počátkem, kde hodnota směrnice byla ztotožněna s konstantou a ze vztahu (1) a to jako $a_1 = (1,835 \pm 0,004) \cdot 10^{-3} AV^{-3/2}$. Zjištěná hodnota spolehlivosti fitu byla zjištěna jako $R^2 = 0,9907$. Dále byla provedena úvaha, kdy byla tato závislost opětovně proložena lineární funkcí, která neměla nastavenou pevnou hodnotu počátku v bodě $[0,0]$. V tomto případě byly u této funkce zjištěny hodnoty parametrů $a_2 = (1,735 \pm 0,002) \cdot 10^{-3} AV^{-3/2}$ a hodnota $b = (1,84 \pm 0,02) mA$. Tato hodnota b byla ztotožněna s údajem o průchozím proudu (I_0) při nulovém přiloženém napětí tedy $I_0 = b = (1,84 \pm 0,02) mA$.



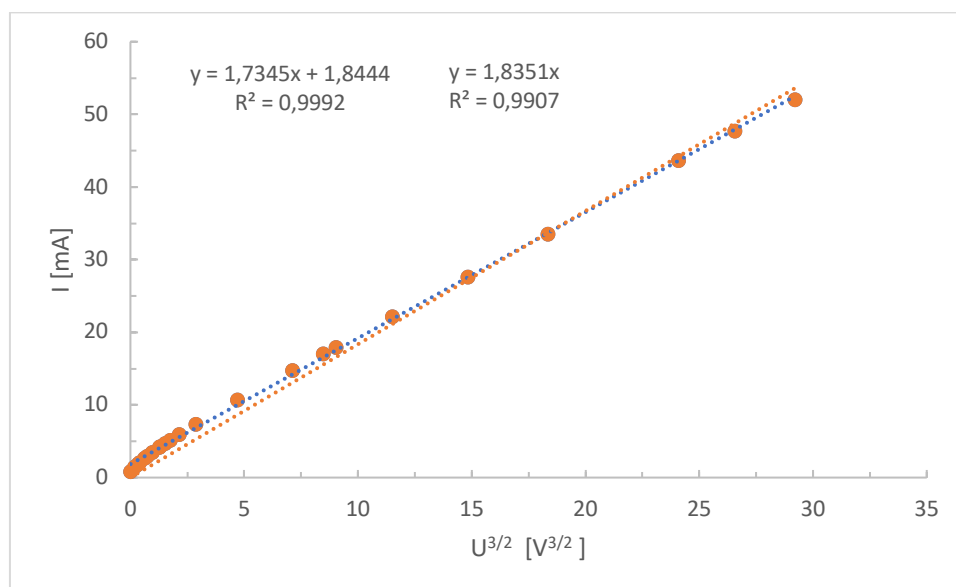
Obr.4. Schéma zapojení V-A charakteristiky v propustném směru.

Tab.1. Záznam měření V-A charakteristiky vakuové diody. Chyby měření hodnot pro použité rozsahy jsou v zájmu zachování přehlednosti dat uvedeny na začátku experimentální části měření a dále použity při výpočtech.

U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
-0,456	0	1,446	5,15
-0,351	0,1	1,659	5,95
-0,267	0,17	2,024	7,36
-0,245	0,2	2,809	10,66
0,044	0,78	3,695	14,73
0,295	1,39	4,15	17
0,450	1,81	4,334	17,94
0,546	2,08	5,098	22,1
0,721	2,64	6,038	27,58
0,812	2,95	6,957	33,49
0,968	3,46	8,339	43,61
1,162	4,13	8,898	47,71
1,188	4,22	9,480	52,01
1,317	4,68		



Graf.1. V-A charakteristika vakuové diody EZ 81 v propustném směru



Graf.2. Závislost $I \sim U^{3/2}$ vakuové diody EZ 81 v propustném směru

V další části měření byla studována Zenerova dioda s označením KZ 703, která byla dle schématu na Obr.3. připojena k měřící aparatuře s laditelným zdrojem MATRIX (MPS 3003L-3) a digitálním převodníkem. V aparatuře byl následně ještě použit již zabudovaný odpor Manganin s referovanou hodnotou 1Ω .

V této konfiguraci byla následně proměřena V-A charakteristika pro Zenerovu diodu, a to jak v propustném, tak v závěrném směru. Měření probíhalo přes program načítající data z převodníku, a to vždy s jistým časovým krokem. Závislosti proto byly nejdříve proměřeny s rychlým krokem zvyšování napětí na zdroji a následně znovu s jemnějším krokem za účelem získání většího počtu dat a tedy i přesnějších výsledků. Tabulka s naměřenými hodnotami není vzhledem ke své obsáhlosti součástí protokolu, avšak je k dispozici v elektronické podobě v laboratoři na použitém počítači, nebo na [3]. Data byly následně vyneseny do grafu V-A charakteristiky (Graf.3.). Jak je z vynesené závislosti patrné, byly pozorovány obě skokové změny proudu na hodnotě napětí na opačných

stranách proměřeného intervalu. Obě tyto větve byly v rámci analýzy z dat vyjmuty a proloženy lineární závislostí.

V propustném směru je aproximovaná lineární závislost ($y = a + bx$) reprezentována přímkou s koeficienty $a_3 = (-2765 \pm 38) \text{ mA}$ a $b_3 = (3911 \pm 49) \cdot 10^{-3} \text{ AV}^{-1}$ s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,989$. Tato závislost byla následně využita ke zjištění hodnoty dynamického odporu při procházejícím proudu 200 mA v propustném směru $r_{200} = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-1} \Omega$ dle vztahu (4). Takto jsme mohli postupem vzhledem k dobré aproximaci naměřených dat lineárním fitem. Obdobně bylo postupováno i v případě hledání dynamického odporu v závěrném směru při -400 mA, kde byla oblast za Zenerovým napětím proložena taktéž lineární závislostí s koeficienty $a_4 = (17\,361 \pm 370) \text{ mA}$ a $b_4 = (2592 \pm 55) \cdot 10^{-3} \text{ AV}^{-1}$ s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 0,9788$. Z těchto údajů byl tedy následně zjištěn dynamický odpor $r_{400} = (4,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-1} \Omega$ a hodnota Zenerova napětí $U_Z = (6,70 \pm 0,03) \text{ V}$.

Hodnota Zenerova napětí byla následně využita v následující úloze při sestavování usměrňovače napětí (Obr.3.), kde byla hodnota předřazeného odporu zjištěna ze vztahu (7) jako $R_S = 6,6 \Omega$. V rámci odporové dekády pak byla použita hodnota odporu 6Ω , čímž by mělo být zajištěno protnutí zátěžové přímky s charakteristikou diody v průrazu.

Naměřené hodnoty pro měření napětí na zdroji napětí a na zenerově diodě jsou zaneseny v Tab.2. V tabulce jsou vyneseny absolutní hodnoty naměřených veličin, jelikož polarita v tomto případě není podstatná.

Tab.2. Měřené napětí na zdroji U_1 a na použité zenerově diodě U_2 v zapojení jako usměrňovač napětí. Multimetry operovaly v nastavení rozsahu 20 V.

U1 [V]	8,51	8,644	8,697	8,799	8,878	9,000	9,079	9,211	9,29	9,347
U2 [V]	6,75	6,755	6,758	6,764	6,768	6,769	6,771	6,776	6,78	6,783

Z naměřených hodnot byl dle (5) a (6) spočten stabilizační činitel $S_u = (10 \pm 1)$

Diskuse:

Pozorované závislosti naměřených V-A charakteristik vykazují stejné průběhy, jako teoretické předpoklady a kvalitativně tak byly vyhodnoceny jako správné.

V rámci studia vakuové diody byla sledována nenulová hodnota průchozího proudu (I_0) na diodě i v případě, kdy nebylo na svorkách přiloženo žádné napětí. Tento jev je způsoben přechodem termálně excitovaných elektronů, které i bez přiloženého vnějšího napětí dokáží překonat energetickou bariéru a přecházejí směrem od katody na anodu. V případě Zenerovy diody bylo stanoveno zenerovo napětí a sledovány obě oblasti přechodu, jak v propustné tak v závěrné části (oblast průrazu).

Závislosti byly ve svých okrajových částech aproximovány pomocí lineárního fitu, ačkoli z podstaty věci více vyhovuje exponenciální závislost, avšak vzhledem k tomu, že hodnoty odečtů dynamických odporů byly ve středech studovaných intervalů, mohlo být toto zjednodušení provedeno. Tento postup potvrzují i hodnoty spolehlivosti použitého lineárního fitu od experimentálních dat.

V rámci měření byly sledovány chyby a odchylky jednotlivých měřících přístrojů a v rámci možností byly tyto chyby taktéž zaneseny do výpočtů. Je však nutné konstatovat, že statistické odchylky a odchylky fitu mají větší vliv na výsledky měření, než již zmíněné měřící přístroje.

Závěr:

V rámci laboratorního praktika byla studována předložená Zenerova a vakuová dioda. Zjištěné závislosti jsou vykresleny v přiložených grafech a zaneseny do tabulek v experimentální části. Lze konstatovat, že naměřené výsledky se v rámci pozorovaných trendů a výskytu charakteristických bodů a křivek shodují s teoretickými předpoklady.

Ze závislosti V-A charakteristiky Zenerovy diody v závěrné oblasti byla zjištěna hodnota Zenerova napětí jako $U_Z = (6,70 \pm 0,03) V$.

Hodnota diferenciálního odporu v propustném směru byla zjištěna jako $r_{200} = (2,5 \pm 0,2) \cdot 10^{-1} \Omega$ a v závěrném směru jako $r_{400} = (4,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-1}$.

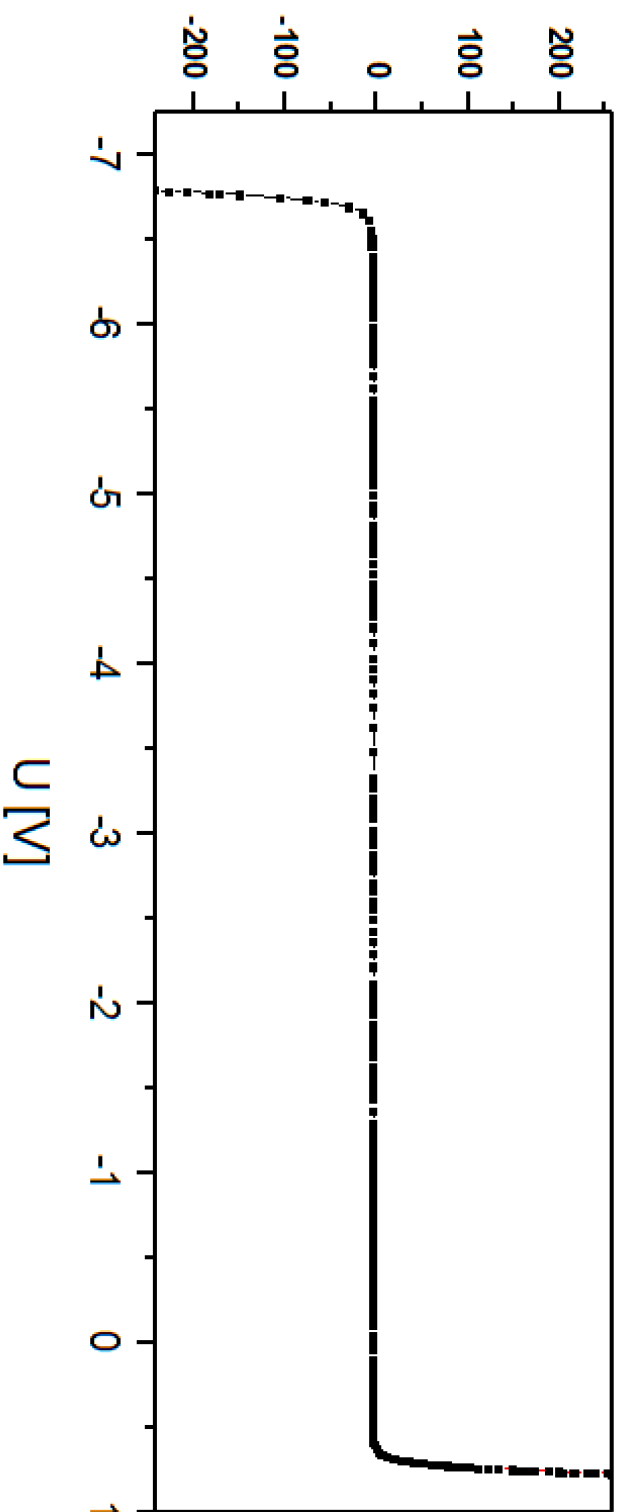
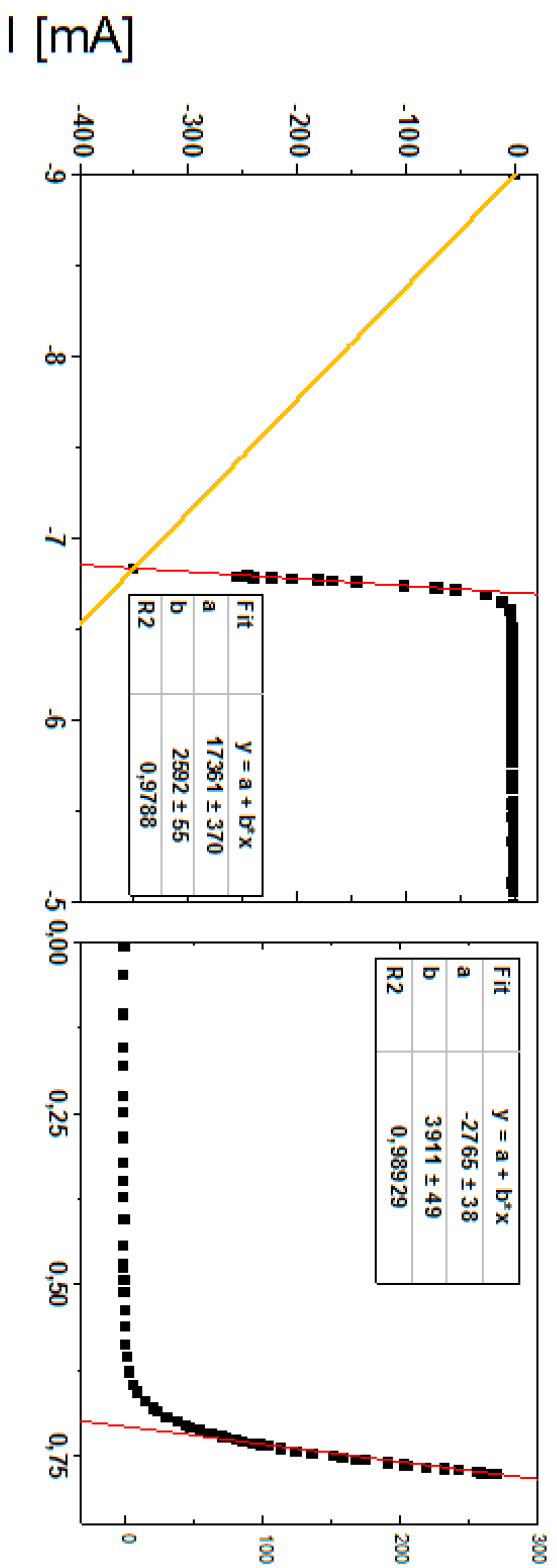
Při studiu sestaveného stabilizačního obvodu se Zenerovou diodou byl stanoven stabilizační činitel jako $S_u() = (10 \pm 1)$.

Literatura:

[1] Studijní texty k laboratorní úloze: Charakteristika diod; Kolektiv autorů ZFP KVOF MFF UK, online zdroj, [cit. 20.10.2018], dostupné na stránkách fyzikálního praktika

[2] Sedlák B., Štol I., Elektřina a magnetismus, Praha, Karolinum, vyd. 3., 2012, ISBN 80-246-2198-2

[3] Produktové listy k měřícím přístrojům, Soubor dokumentů z Fyzikálního praktika II. a další produktové listy, online zdroj, [cit.20.10.2018], dostupné z: work.jhrabovsky.cz/mff/praktikum2



Graf.3. Voltampérová charakteristika Zenerovy diody KZ 703 v propustném a závěrném směru se zanesenou zátěžovou přímkou o parametrech $U = -9$ V a $I = -350$ mA