

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

PRAKTIKUM ...

Úloha č.

Název:

Pracoval: stud. skup. dne

Odevzdal dne:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 – 5	
Teoretická část	0 – 1	
Výsledky měření	0 – 8	
Diskuse výsledků	0 – 4	
Závěr	0 – 1	
Seznam použité literatury	0 – 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval: dne

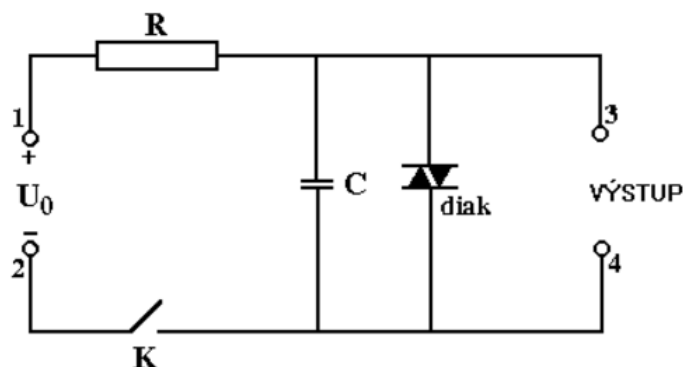
Pracovní úkoly

1. Proměřte voltampérovou charakteristiku diaku a z ní určete:
 - (a) spínací napětí při obou polaritách U_{B01}, U_{B02} ,
 - (b) pokles napětí na diaku při překročení spínacího napětí ΔU (při obou polaritách),
 - (c) tzv. symetrii diaku $|U_{B01} - U_{B02}|$.
2. Zapojte diak jako zdroj relaxačních kmitů a změřte závislost periody těchto kmitů T na časové konstantě $\tau = RC$ obvodu při konstantním napětí zdroje (cca 40 V). Kmitočet relaxačních kmitů měřte běžně čítačem, při několika řádově různých hodnotách však též přímo osciloskopem a porovnáním s kmitočtem generátoru (pomocí Lissajousových obrazců). V referátu porovnejte přesnost použitých metod měření kmitočtu.
3. Změřte závislost frekvence kmitů f na napětí zdroje U_0 . Pomocí osciloskopu určete z amplitud relaxačních kmitů hodnoty zhášecího napětí U_{zh} a naměřené hodnoty ověřte výpočtem.

1 Teoretická část

1.1 Diak

Diak je třívrstvá polovodičová součástka tvořena postupně vrstvami P, N a P. Jedná se v podstatě o zapojení tranzistoru se společným emitorem a s nepřípojeným obvodem báze, tedy bázový proud je stále nulový. Diakem proud neprochází dokud napětí na něm nepřekročí hodnotu tzv. spínacího napětí U_{B0} . Pak dojde k lavinovitému průrazu přechodu, napětí na diaku poklesne o ΔU v závislosti na proudu I procházejícím [1], tedy zmenší se jeho stejnosměrný odpor. Protože se jedná o symetrickou součástku, i jeho voltampérová charakteristika je teoreticky symetrická ve dvou možných zapojeních (postupně 1. a 2. svorka (1,2), nebo obráceně (2,1), tomu odpovídající napětí U_{B01} a U_{B02}). V praxi však dochází k odchýlkám způsobených technologií výroby. Tzv. symetrie diaku, neboli $|U_{B01} - U_{B02}|$, toto charakterizuje.



Obr. 1: Schéma zapojení diaku pro generování relaxačních kmitů.

1.2 Relaxační kmitý

Diaku lze využít ke generování relaxačních kmitů v obvodu znázorněném na obr. 1. Přes odpor R je paralelně zapojen kondenzátor s diakem ke zdroji napětí U_0 , které je větší než spínací napětí diaku U_{B0} . V momentě sepnutí obvodu (čas $t = 0$) se začne kondenzátor nabíjet se vzrůstajícím napětím U na něm podle vztahu

$$U = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \quad (1)$$

Když napětí U dosáhne hodnoty U_{B0} , dojde k sepnutí diaku a kondenzátor se přes něj začne vybíjet, dokud napětí nedosáhne hodnoty zhášecího napětí U_{zh} , při kterém se diak opět vypne a proud jím přestává procházet. Kondenzátor se začne znovu nabíjet a celý děj se opakuje. V ideálním případě by se diak vypnul až při $U = 0$ V, tedy při úplném vybití kondenzátoru. Proud však přestává téci již při nenulové hodnotě U_{zh} . Časový průběh napětí na kondenzátoru je tak dán vztahem

$$U - U_{zh} = (U_0 - U_{zh}) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad (2)$$

který platí v případě, že odpor neseprnutého diaku je nekonečně velký. Jelikož napětí U stoupá pouze k hodnotě U_{B0} a pak se kondenzátor vybíjí, této informace můžeme využít k výpočtu doby nabíjení t_1 v závislosti na časové konstantě $\tau = RC$, napětí zdroje U_0 a spínacím napětí U_{B0} :

$$t_1 = \tau \log \left(\frac{U_0 - U_{zh}}{U_0 - U_{B0}} \right). \quad (3)$$

V případě že odpor seprnutého diaku je nulový, pak se kondenzátor vybije v nulovém čase t_2 a t_1 je rovno době kmitu T . Odpor seprnutého diaku sice nulový obecně není, ale pro naprostou většinu měření je $t_2 \ll t_1$ a periodu T můžeme dobře položit rovno právě době nabíjení t_1 .

1.3 Měření

Nejprve proměříme symetrii diaku a jeho voltampérovou charakteristiku pomocí voltmetru a miliampérmetru v obvodu s předřazeným odporem min. 3 k Ω . Spínací napětí U_{B01} a U_{B02} hledáme pomocí funkce digitálního voltmetru ponechávající na displeji maximální naměřenou hodnotu napětí.

Při měření relaxačních kmitů připojíme výstup naznačený v obr. 1 na vertikální destičky osciloskopu. Na horizontální ose osciloskopu ponecháme jeho časovou základnu. Přímou pomocí osciloskopu a jeho funkcí můžeme ze zobrazené křivky zjistit periodu T , příp. velikost výchylky na napěťové ose, obecně $|U_a - U_b|$. Při zkoumání Lissajousových obrazců pak na horizontální osu přivádíme signál z oscilátoru (generátoru).

1.4 Použité přístroje a pomůcky

Miliampérmetr Miliampérmetr byl třídy přesnosti 0.2, při použitím rozsahu 15 mA během měření VA charakteristiky a uvážené chyby odečítání 1 dílek na 150 dílné stupnici pak $\Delta I = 0.1$ mA.

Digitální voltmetr S vždy použitým rozsahem 200 V má chybu $\pm 0.3\% + 1$ digit.

Osciloskop Použit při studiu relaxačních kmitů. Pro odečítání údajů z časové základny byla uvedena chyba 5 %, určení pot. rozdílu (zjištění napětí) pak 3 %.

Oscilátor (generátor) Chyba určování frekvence oscilátoru je dána počtem a rozmístěním dílků na jeho stupnici. Při $\times 100$ násobku Hz je stupnice značkována po 10 až 20 (pro vyšší frek.) Hz, při uvážení přesnosti odečítání půl až jeden dílek (jsou různě daleko od sebe, logaritmická stupnice) tedy 5 až 20 Hz. Odchytky při $\times 1000$ násobku Hz jsou pak odpovídající.

diak KR 105, frekvenční čítač, odporová a kondenzátorová dekáda, zdroj stejnosměrného napětí

2 Výsledky měření

2.1 Zpracování

Není-li uvedeno jinak, chyby přímých měření jsou počítány podle [2] jako

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_{stat}^2 + \sigma_{mer}^2}, \quad (4)$$

kde σ_{stat} je statistická chyba a σ_{mer} chyba odečítání ze stupnice při měření veličiny v . Chyby nepřímě měřených veličin počítám podle:

$$\sigma_{f(x_i)} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (5)$$

2.2 Voltampérová charakteristika diaku

Měřil jsem VA charakteristiku se sériově připojeným miliampérmetrem, tomu předřazený voltmetr a odpor $R = 3$ k Ω . Nejprve jsem zjišťoval spínací napětí diaku při polaritě 1,2 U_{B01} a 2,1 U_{B02} pomocí fce max na digitálním voltmetru a pomalým zvyšováním napětí zdroje. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 1, z nich spočtena střední hodnota. Mohu tedy nalézt symetrii diaku:

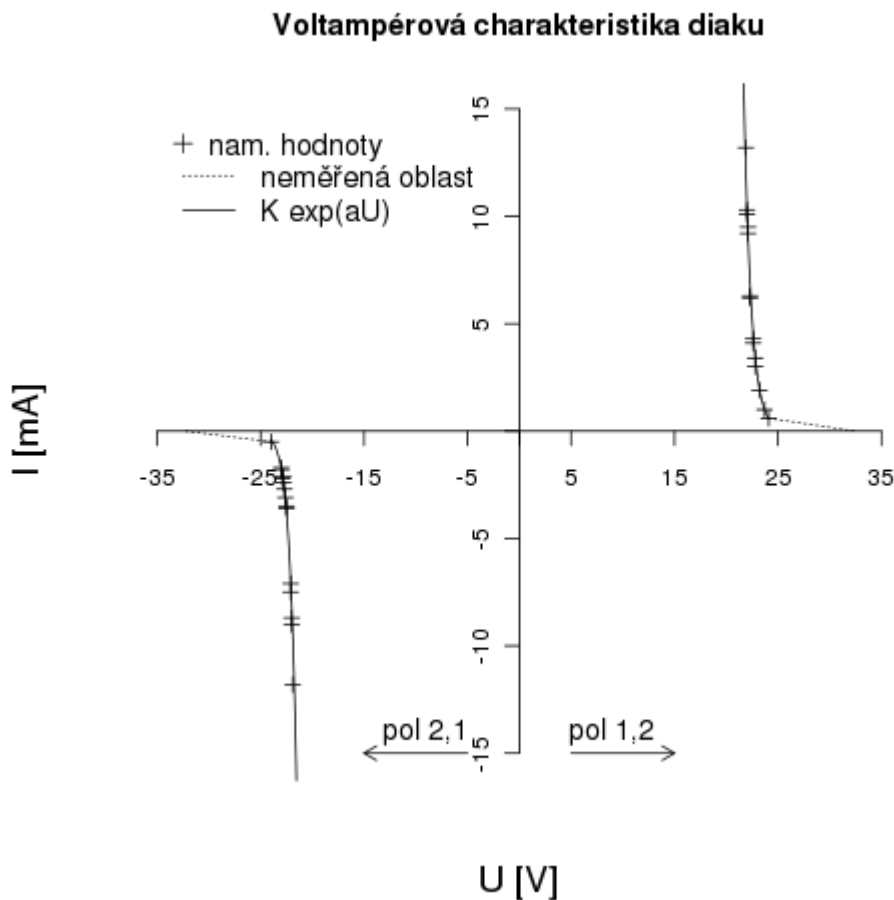
$$|U_{B01} - U_{B02}| = (0.25 \pm 0.09) \text{ V.}$$

č. měření	1	2	3	4	5	6	$\overline{U_{B0}}$ [V]
U_{B01}	32.9	31.1	32.8	32.5	32.4	32.8	32.42 ± 0.04
U_{B02}	31.8	32.1	32.0	32.2	32.4	32.5	32.27 ± 0.04

Tabulka 1: Naměřená spínací napětí diaku při polaritě 1,2 U_{B01} a 2,1 U_{B02} a jejich střední hodnota.

polarita 1,2																
U [V]	22.8	22.6	22.3	22.1	22.0	21.9	22.0	22.1	22.3	22.6	22.8	23.2	23.7	24.1	25.5	
I [mA]	3.4	4.1	6.2	9.5	10.1	13.2	10.3	9.2	6.3	4.3	3.0	1.9	1.0	0.6	–	
polarita 2,1																
U [V]	23.0	22.9	22.8	22.7	22.6	22.5	22.1	22.0	21.9	22.0	22.1	22.5	22.8	23.0	24.0	25.0
I [mA]	1.7	2.2	2.4	2.7	3.1	3.6	7.1	8.7	11.8	9.0	7.5	3.5	2.1	1.8	0.5	–

Tabulka 2: VA charakteristika diaku v sepnutém stavu při obou polaritách. Znak "–" říká, že přibližně při tomto napětí zcela přestal proud diakem procházet a ten vypnul.



Obr. 2: Celková VA charakteristika diaku při obou polaritách 1,2 (vpravo) i 2,1 (vlevo). Tečkovaně je naznačena neměřená oblast.

Poté jsem proměřil VA charakteristiku diaku v sepnutém stavu při obou polaritách. To ilustruje tabulka 2 a celkový graf na obr. 2. Z výsledků lze přibližně zjistit konkrétní závislost úbytku napětí ΔU na velikosti proudu procházejícím diakem. Já jsem z nich odtušil lineární závislost na logaritmovaných hodnotách I a proložil tedy graf exponencielou. Mohu určit úbytky napětí při proudu např. 10 mA v zapojení polaritě 1,2:

$$\Delta U_1 = (10.4 \pm 0.5) \text{ V},$$

v polaritě 2,1 pak:

$$\Delta U_2 = (10.4 \pm 0.8) \text{ V}.$$

Znaménkovou konvencí jsem ponechal pouze v grafu (obr. 2), jinak samozřejmě U_{B02} , U a I pro polaritu 2,1 jsou měřeny jako absolutní hodnoty veličin. V grafu jsem je vynesl jako záporné čistě kvůli názornosti.

2.3 Relaxační kmity

2.3.1 Závislost periody T na časové konstantě $\tau = RC$

R [k Ω]	C [μ F]	$\tau = RC$ [ms]	f_c [Hz]	T_c [ms]	T_o [ms]	f_o [Hz]
5	1.00	5.0	110	9.0 ± 0.5	8.98	111 ± 6
5	0.90	4.5	122	8.2 ± 0.4	8.16	123 ± 6
5	0.80	4.0	137	7.3 ± 0.4	7.26	138 ± 7
5	0.60	3.0	185	5.4 ± 0.3	5.39	186 ± 9
5	0.40	2.0	260	3.8 ± 0.2	3.85	260 ± 13
5	0.30	1.5	353	2.8 ± 0.1	2.84	352 ± 18
5	0.20	1.0	556	1.80 ± 0.09	1.78	562 ± 28
5	0.18	0.9	665	1.50 ± 0.08	1.49	671 ± 34
5	0.16	0.8	764	1.31 ± 0.07	1.30	769 ± 38
5	0.14	0.7	899	1.11 ± 0.06	1.11	901 ± 45
5	0.12	0.6	1090	0.92 ± 0.05	0.92	1087 ± 54
5	0.10	0.5	1368	0.73 ± 0.04	0.73	1370 ± 68
5	0.08	0.4	2090	0.48 ± 0.02	0.48	2080 ± 100

Tabulka 3: Závislost frekvence f_c měřené přímo frekvenčním čítačem na parametrech obvodu, z ní vypočtená perioda T_c . Perioda T_o měřená na displeji osciloskopu, z ní vypočtená frekvence f_o .

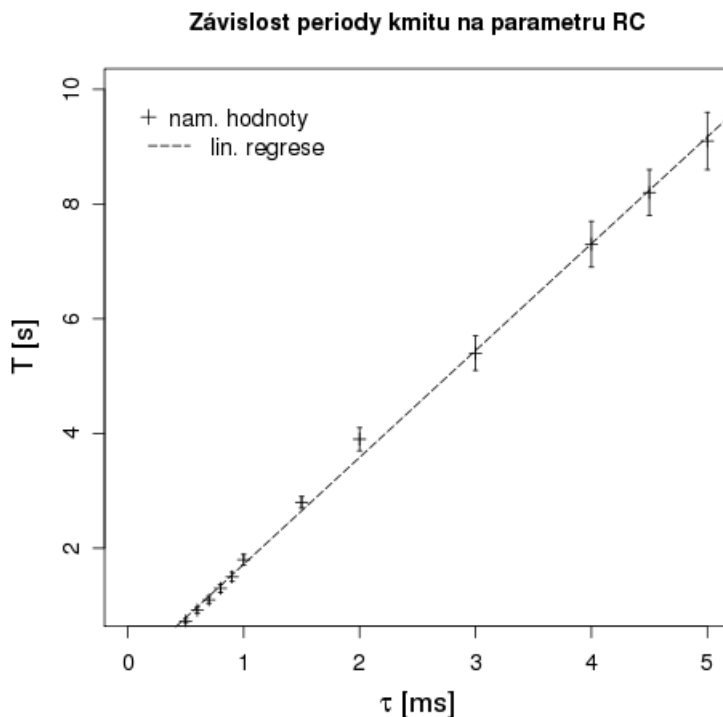
Závislost periody kmitu na časové konstantě obvodu (obr. 1) τ jsem měřil pro napětí zdroje $U_0 = (40.0 \pm 0.2)$ V, s předřazeným odporem $R = 5$ k Ω , v zapojení polarity diaku 2,1 a kapacitu kondenzátoru jsem měnil v intervalu 0.08 - 1.00 μ F. Frekvence kmitů byla zjišťována přímo čítačem (f_c), pro kontrolu a porovnání pak byla ještě odečítána doba periody z nabíjecí křivky na displeji osciloskopu (T_o). Statistická chyba použitého čítače je velice malá, chyba odečítání z časové základny osciloskopu je 5 %. Hrubá chyba experimentátora byla minimalizována volbou nejmenšího možného rozsahu k proměrování kýžené křivky na osciloskopu. Nicméně občasné znovu nastavení konkrétních parametrů a opakování pokusu ukázalo, že měření není dokonale replikovatelné, speciálně zatímco hodnota T_o zůstává v rámci 5 % chyby podle předpokladu a možností rozlišení osciloskopu, čítačem měřená f_c kolísá podobným způsobem. Proto byla vzata do úvahy chyba konečné f_c taktéž cca 5 % z naměřené. Výsledky najdete v tabulce 3 a závislost popisuje také graf na obr. 3.

R [k Ω]	C [μ F]	τ [ms]	f_c [Hz]	f_g [Hz]	n	f [Hz]
5	1.00	5.0	118	118	1	118 ± 5
5	0.90	4.5	132	130	1	130 ± 5
5	0.80	4.0	151	150	1	150 ± 5
5	0.60	3.0	207	205	1	205 ± 5
5	0.40	2.0	297	290	1	290 ± 5
5	0.20	1.0	663	2050	3	683 ± 7
5	0.18	0.9	799	2240	3	747 ± 7
5	0.14	0.7	1074	3250	3	1083 ± 7
5	0.10	0.5	1630	5060	3	1687 ± 7

Tabulka 4: Některé hodnoty z měření pomocí Lissajousových obrazců. Frekvence kmitů odečtená z čítače f_c , frekvence generovaná připojeným oscilátorem f_g , počet Lissajousových křivek na displeji osciloskopu n a výsledná frekvence kmitů takto získaná f .

2.3.2 Zjišťování frekvence kmitů obvodu pomocí metody Lissajousových obrazců

Na jednom ze vstupů osciloskopu je připojen oscilátor (generátor), na druhém zůstává diak, časová základna osciloskopu se vypne (příp. se přepne funkce osciloskopu). Pokud oscilátor právě generuje signál o frekvenci n -násobku frekvence relaxačních kmitů obvodu, na displeji osciloskopu pozorujeme ideálně nehybný obraz n Lissajousových křivek (sinusovky). Odečtením frekvence generovaného signálu z oscilátoru tak můžeme snadno zjistit frekvenci zkoumaných relaxačních kmitů. Ty pak porovnááme s údaji zobrazenými čítačem. Výsledky viz. tab. 4.



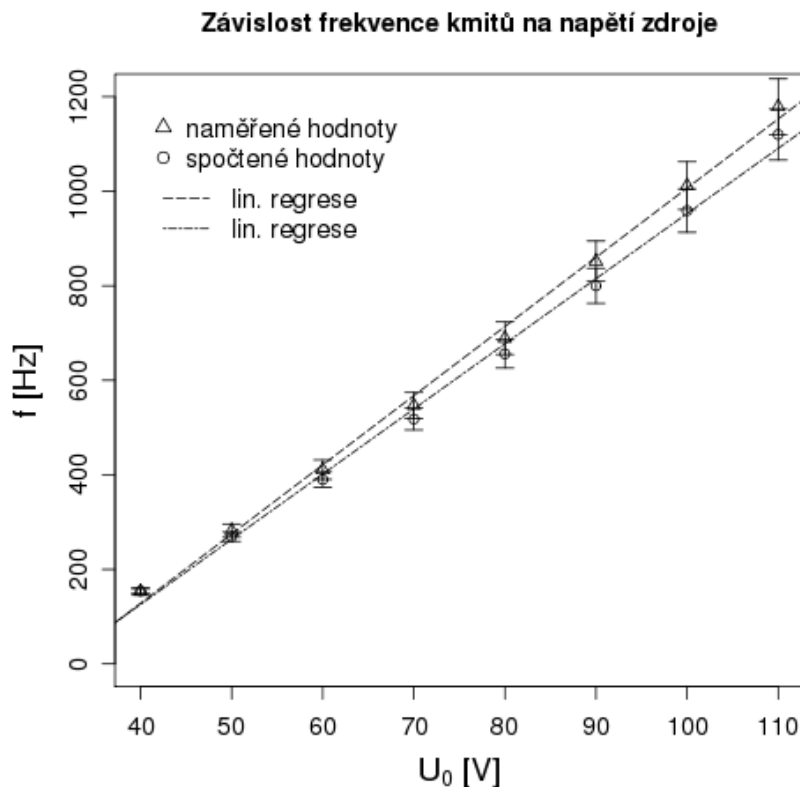
Obr. 3: Graf závislosti periody kmitů T na časové konstantě obvodu $\tau = RC$.

2.3.3 Závislost frekvence kmitů f na napětí zdroje U_0

Závislost měřím stále v zapojení podle obr. 1 s konstantním předřazeným odporem $R = 5 \text{ k}\Omega$ a kapacitou $C = 1.00 \text{ }\mu\text{F}$, diak s polaritou 2,1. Frekvenci f_c získám opět přímo z čítače, amplitudu $|U_{B0} - U_{zh}|$ kmitu měřím na displeji osciloskopu. Chybu odečtené frekvence uvažuji znovu 5 % z měřeného, chybu stanovení napětí z vert. osy osciloskopu 3 % občas mírně nadhodnocuji, vlastní chybu minimalizuji volbou rozlišení displeje. Z již výše známé hodnoty spínacího napětí při zvolené polaritě U_{B02} tak dostanu velikost zhášecího napětí jako $U_{zh} = U_{B02} - |U_{B0} - U_{zh}|$. Poté podle (3) dopočtu teoretickou dobu nabíjení $t_{1,teor}$ a uvážením $t_1 \gg t_2$ položím i předpokládanou periodu kmitů $T_{teor} = t_{1,teor}$. Nakonec z ní vyjádřím frekvenci f_{teor} . Výsledky v tabulce 5, porovnání měřené a teoretické závislosti pak v grafu na obr. 4.

U_0 [V]	f_c [Hz]	$ U_{B0} - U_{zh} $ [V]	U_{zh} [V]	T_{teor} [ms]	f_{teor} [Hz]
40	153	20.7	11.5 ± 1.1	6.45 ± 0.22	155 ± 5
50	282	19.6	12.6 ± 1.0	3.69 ± 0.14	271 ± 10
60	411	18.6	13.6 ± 1.0	2.55 ± 0.11	392 ± 16
70	547	17.8	14.4 ± 0.9	1.92 ± 0.08	521 ± 23
80	689	17.0	15.2 ± 0.9	1.51 ± 0.07	661 ± 30
90	852	16.4	15.8 ± 0.9	1.24 ± 0.06	805 ± 37
100	1012	15.7	16.5 ± 0.8	1.04 ± 0.05	966 ± 46
110	1179	15.2	17.0 ± 0.8	0.89 ± 0.04	1128 ± 54

Tabulka 5: Frekvence kmitů měřená čítačem f_c v závislosti na napětí zdroje U_0 , velikost amplitudy nabíjecí křivky získaná z displeje osciloskopu $|U_{B0} - U_{zh}|$, odpovídající zhášecí napětí U_{zh} a dopočtené teoretické hodnoty periody a frekvence kmitů T_{teor} a f_{teor} .



Obr. 4: Graf závislosti frekvence relaxačních kmitů na napětí zdroje U_0 a porovnání s teoretickou závislostí získanou použitím dříve zjištěného spínacího napětí diaku U_{B02} a vztahu (3).

3 Diskuse výsledků

Voltmetr při použití funkce zaznamenávající nejvyšší naměřené napětí pro zjištění spínacích napětí diaku pracuje s určitou vzorkovací frekvencí, tedy měří pouze v určitých časových intervalech a nikoli spojitě neustále. Chybu tímto vnesenou jsem minimalizoval dostatečně pomalým navyšováním napětí zdroje tak, aby se hodnota na displeji měnila po 0.1 V. Předpokládám tedy, že výsledná odchylka nečiní více než 0.1 V, důsledkem čehož jsem nemusel statistickou chybu razantně navyšovat. Výsledná spínací napětí určená jako střední hodnoty pak vystupují s odchylkou aritmetického průměru.

Naměřená spínací napětí i symetrie diaku (jakož i celková charakteristika na obr. 2) splňují předpoklady. Obě U_{B0} vychází mezi 20 a 40 V, symetrie je menší než jednotky V, tvar charakteristiky i pokles napětí při odpovídá teoretickému popisu součástky diaku.

Při studiu závislosti periody relax. kmitů na čas. konst. τ , resp. frekvence na napětí zdroje, doba vybíjení kondenzátoru t_2 splňovala podmínku $t_2 \ll t_1$ (doba nabíjení) a mohl jsem tedy o t_1 uvažovat jako o výsledné periodě kmitu T . Měření čítačem (jehož stat. chybu odhaduji do 1 %) je v rámci jednoho provedení přesnější než odečítání periody z osciloskopu. Ovšem, jak bylo již zmíněno, po opětovné nastavení identických parametrů se jím naměřené hodnoty trochu liší (narozdíl od osciloskopu, díky jehož rozlišení ten změny nezaznamená). Berouc v potaz tento jev nadhodnotil jsem výslednou chybu při měření čítačem na cca 5 %.

Měření pomocí metody Lissajousových obrazců je potenciálně velice přesnou metodou. Chyba stanovení generované frekvence z logaritmické stupnice oscilátoru je sice značná, vhodným nastavením (zvyšováním celočíselného násobku frekvence) ji však lze (v rámci možností stupnice oscilátoru, displeje osciloskopu atd.) silně redukovat, jak je vidět z tabulky 4. Navíc nám tato metoda teoreticky podává informace i o dynamice systému např. pozorováním, jak se ideálně statické křivky po nastavení na displeji okamžitě rozbíhají.

Nezanedbatelný vliv na naměřené výsledky má bezpochyby teplota. Vlivem přeměny el. energie na tepelnou se diak zahřívá, ale jeho vlastnosti (stejně jako vlastnosti jiných polovodičových součástek) jsou na teplotě závislé. Tohle je nejvíce patrné ze zaznamenaných hodnot při měření výchyly kmitů během studování závislosti frekvence

na napětí zdroje U_0 . Z osciloskopu lze totiž vedle amplitudy kmitu $|U_{B0} - U_{zh}|$ při znalosti nulové hladiny (stačí uzemnit vstup a tak ji identifikovat) odečítat i přímo hodnoty U_{B0} a U_{zh} , které jsou k nahlédnutí na záznamech z měření v příloze. Z těch je patrné, že při zvyšování U_0 se postupně zmenšuje spínací napětí. To koresponduje s vysvětlením, že vlivem zahřívání diaku se v jeho vrstvách zvyšuje množství volných nosičů náboje, jeho teoreticky nekonečně velký odpor klesá, tedy potřebné spínací napětí je naopak o něco menší a není proto rovno ve výpočtech uvažovanému U_{B02} .

4 Závěr

Bylo zjištěno spínací napětí diaku v zapojení obou polarit

$$U_{B01} = (32.42 \pm 0.04) \text{ V}, \quad U_{B02} = (32.27 \pm 0.04) \text{ V}$$

a proměřena jeho voltmapérovou charakteristika, viz. tabulky 1 a 2, příp. graf na obr. 2. Z výsledků určena symetrie diaku

$$|U_{B01} - U_{B02}| = (0.25 \pm 0.09) \text{ V}$$

a pokles napětí na diaku při procházejícím proudu 10 mA při obou polaritách:

$$\Delta U_1 = (10.4 \pm 0.5) \text{ V}, \quad \Delta U_2 = (10.4 \pm 0.8) \text{ V}.$$

Zkoumána byla závislost periody relaxačních kmitů v obvodu na obr. 1 na velikosti časové konstanty $\tau = RC$ při konstantním napětí zdroje, vedle přímého měření čítačem, resp. osciloskopem, byla použita i metoda Lissajousových obrazců. Měření popisují tabulky 3 a 4, závislost je znázorněna v grafu na obr. 3.

Nakonec byla proměřena i závislost frekvence rel. kmitů na velikosti napětí připojeného zdroje a výsledky byly porovnány s teoretickými hodnotami spočtených na základě dříve získaných dat. Viz. tabulka 5 a graf na obr. 4.

Použitá literatura

- [1] Studijní text, PII - XIV Relaxační kmitů, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/>
- [2] English J.: Zpracování výsledků fyzikálních měření, 1999, <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp>