Martin Beránek, 2.F, X–11

Úloha 14 – Relaxační kmity

Pracovní úkol:

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 $|U_{B01} - U_{B02}|$.

   Všechny určené hodnoty porovnejte s katalogovými.
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.

Teorie:

Diak. Při připojení k napětí menšímu než spínací se chová jako velmi velký odpor. Pokud napětí na jeho svorkách stoupne až k hodnotě U_{B0} (tj. spínací napětí), dojde k průrazu přechodu a napětí na součástce prudce poklesne. Pak zůstane otevřený a velikost protékajícího proudu se mění opačně než napětí (tedy při poklesu napětí vzroste protékající proud). Diak se chová stejně při obou polaritách napětí. Drobné odchylky způsobené výrobními nepřesnostmi se udávají jako symetrie charakteristiky diaku

$$|U_{B01} - U_{B02}|\,, \tag{1}$$

kde U_{B01}, resp. U_{B02} jsou spínací napětí při jedné resp. druhé polaritě připojení diaku.

Relaxační kmity. Pokud ke zdroji připojím paralelně kondenzátor a diak podle schématu na obrázku 1, bude se nejprve kondenzátor nabíjet přes odpor R. Diak v tuto chvíli proud téměř nevede. Napětí na kondenzátoru se tedy mění podle vztahu

$$U = U_0 \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\right)\,. \tag{2}$$

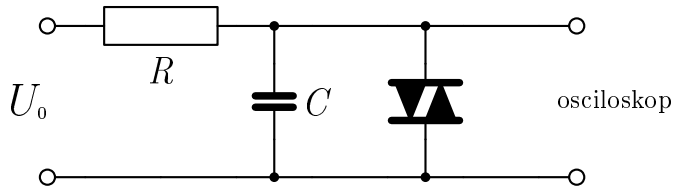
Ve chvíli, kdy napětí na kondenzátoru dosáhne hodnoty spínacího napětí diaku, začne se kondenzátor přes diak velmi rychle vybíjet. Toto vybíjení skončí při určité hodnotě zhášecího napětí U_{zh}, kdy se diak opět uzavře a kondenzátor se začne nabíjet. Kmity tedy neprobíhají od nulové hodnoty, ale od hodnoty U_{zh}. Vztah (2) je tedy potřeba upravit na

$$U - U_{zh} = (U_0 - U_{zh}) \cdot \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{RC}}\right)\,. \tag{3}$$

Nabíjení se zastaví ve chvíli, kdy $U = U_{B0}$. Doba nabíjení t_1 je tedy po dosazení do vztahu (3)

$$t_1 = RC \cdot \ln\left(\frac{U_0 - U_{zh}}{U_0 - U_{B0}}\right)\,. \tag{4}$$

Za předpokladu, že vybíjení trvá řádově kratší dobu než nabíjení (což je při hodnotách měřených v této úloze většinou splněno), mohu t_1 považovat za periodu kmitů.



Obrázek 1 – měření kmitů

Perioda kmitů se dá měřit buďto přímo odečtením na osciloskopu, případně jako převrácená hodnota frekvence změřené čítačem, nebo porovnáním s referenční frekvencí. Při poslední metodě se na jednu osu osciloskopu připojí zkoumané napětí a na druhou signál z generátoru o známé frekvenci. Pokud je obrazec na osciloskopu ustálený, odpovídá poměr zkoumané a referenční frekvence poměru počtu vertikálních a horizontálních maximálních výchylek.

MĚŘENÍ: Měřil jsem parametry diaku KR 105. Spínací napětí jsem zjišťoval voltmetrem s pamětí na maximální (příp. minimální) naměřenou hodnotu. Použitý digitální voltmetr má jistou vzorkovací frekvenci, takže téměř nikdy při postupném zvyšování napětí nezměří maximální hodnotu. Dále vlastnosti diaku jsou stejně jako u ostatních polovodičových součástek závislé na teplotě a ta se v průběhu měření mění kvůli ztrátovému výkonu na diaku. Naměřené hodnoty spínacího napětí pro obě polarity diaku jsou uvedeny v tabulce 1.

U_{B01} [V]	30,5	30,3	30,4	30,9	30,3
U_{B02} [V]	29,1	28,9	29,0	28,5	29,3

Tabulka 1

Chybu měření danou voltmetrem (hlavně jeho vzorkovací frekvencí) odhaduji na $\pm 0{,}4\,\mathrm{V}$. Spolu se statistickou chybou pak vychází

$$U_{B01} = (30{,}5 \pm 0{,}5)\,\mathrm{V} \qquad \text{a} \qquad \mathrm{U}_{B02} = (29{,}0 \pm 0{,}5)\,\mathrm{V}\,.$$

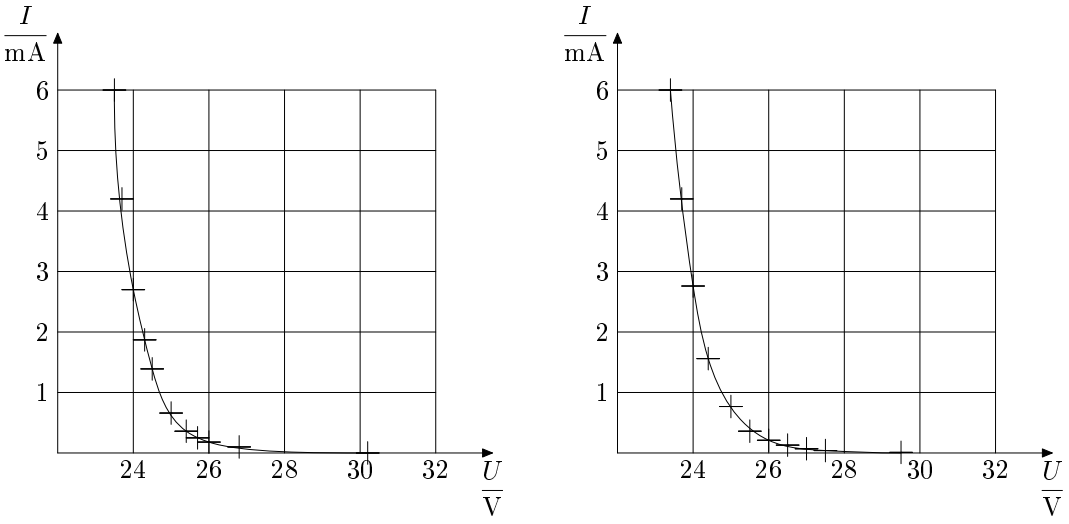
Z toho je symetrie charakteristiky diaku

$$|U_{B01} - U_{B02}| = (1{,}5 \pm 1{,}0)\,\mathrm{V}\,.$$

Při měření voltampérové charakteristiky byl procházející proud až do průrazu diaku menší než $6\,\mu\mathrm{A}$, tedy pod citlivostí použitého miliampérmetru. Po průrazu jsme měřil charakteristiku při obou polaritách až do proudu $6\,\mathrm{mA}$. Zjištěné hodnoty jsou v tabulce 2 a výsledná charakteristika v grafu 1. Kladné hodnoty odpovídají polaritě zapojení označované indexem 1 a záporné indexem 2.

U [V]	23,5	23,7	24,0	24,3	24,5	25,0	25,4	25,7	26,0	26,8	30,2
I [mA]	6,0	4,2	2,7	1,87	1,39	0,66	0,36	0,25	0,18	0,10	0,00
U [V]	−23,4	−23,7	−24,0	−24,4	−25,0	−25,5	−26,0	−26,5	−27,0	−27,5	−29,5
I [mA]	−6,0	−4,2	−2,76	−1,56	−0,77	−0,36	−0,21	−0,13	−0,07	−0,04	−0,01

Tabulka 2



Graf 1 – VA charakteristika diaku KR 105 při obou polaritách

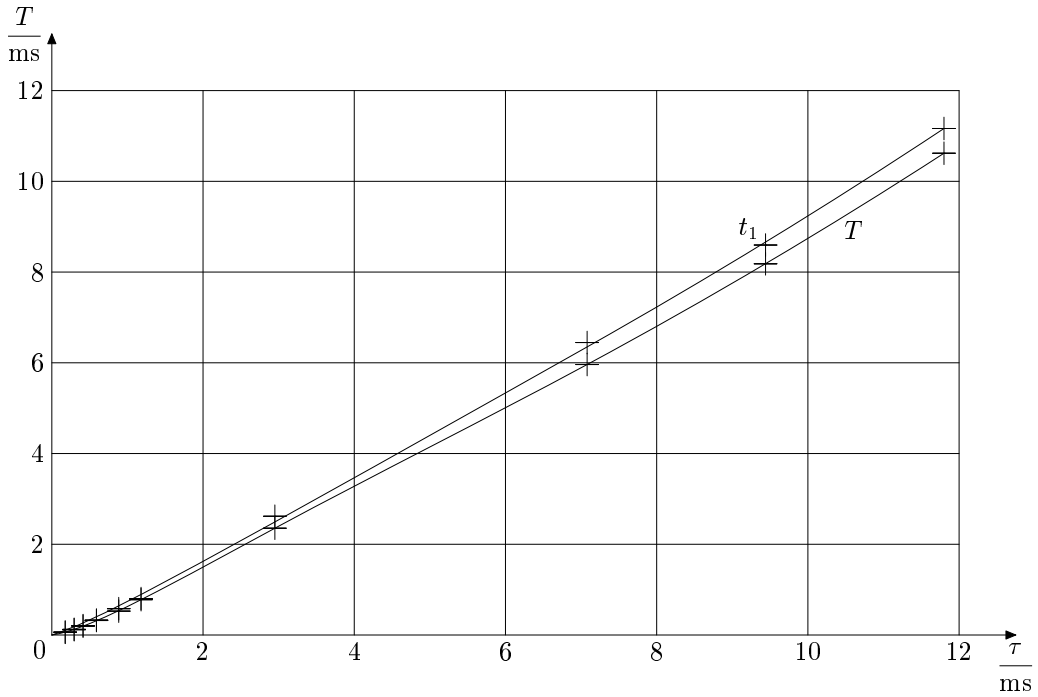
Při proudu 6 mA je tedy pokles napětí $\Delta U_1 = (7{,}0 \pm 0{,}5)$ V a $\Delta U_2 = (5{,}6 \pm 0{,}5)$ V. Předpokládám, že chyba přístrojů je řádově menší, než chyba určení průrazného napětí výše.

Dále jsem ke zdroji připojil diak paralelně s kondenzátorem. Měřil jsme relaxační kmity při konstantním napětí zdroje $U_0 = (50{,}5 \pm 0{,}2)$ V. Kondenzátor se nabíjel přes ochranný odpor diaku $R_o = 1{,}8\,\mathrm{k\Omega}$ a odpor dekády, která byla po celou dobu měření nastavena na hodnotu $R = 10\,\Omega$. Kondenzátor byl také tvořen dekádou a změnou hodnoty kapacity jsme měnil časovou konstantu $\tau = RC$. Periodu kmitů obvodu jsem měřil přímo osciloskopem, na kterém bylo možné odečíst přímo časový interval mezi vybranými body, a zároveň čítačem. Chyba obou metod je srovnatelná, takže jako periodu použiji průměrnou hodnotu a rozdíl těchto metod, který činil maximálně 2% považuji za chybu měření. Získané hodnoty jsou v tabulce 3. V grafu 2 jsou naměřené hodnoty (křivka označená T) a spočtené doby nabíjení t_1.

C [μF]	1	0,8	0,6	0,25	0,10	0,075	0,050	0,035	0,025	0,015
τ [ms]	11,8	9,44	7,08	2,95	1,18	0,885	0,590	0,413	0,295	0,177
T [ms]	10,6	8,18	5,96	2,35	0,78	0,526	0,319	0,195	0,124	0,0639
U_{B0} [V]	34	33	33	33	30	30	29	29	28	28
U_{zh} [V]	8	7	7	8	10	11	13	15	17	19
t_1 [ms]	11,2	8,60	6,45	2,62	0,803	0,580	0,328	0,207	0,117	0,060

Tabulka 3

Hodnota t_1 je spočítána podle vztahu (4). Hodnoty U_{zh} i U_{B0} závisí na frekvenci, takže používám naměřené údaje. Hodnoty napětí jsou odečítané z obrazovky osciloskopu, takže přesnost je dost nízká. Předpokládám ± 1 V pro oba rozdíly napětí v argumentu logaritmu ze vztahu (4). Z toho vychází chyba t_1 přibližně 10% (při vyšších frekvencích je ještě větší).



Graf 2 – závislost periody kmitů na τ

Pro několik hodnot kapacity C jsme změřil frekvenci metodou referenčního signálu z generátoru. Naměřené hodnoty jsou v tabulce 4.

Při stejném zapojení s kapacitou $C = 0{,}1\,\mu$F jsem měřil závislost periody kmitů na napětí zdroje U_0. Odpor přes který se nabíjí kondenzátor je stále stejný, tedy $R = 11{,}8\,\mathrm{k\Omega}$. Teoreticky by měla perioda při

C [μF]	1,0	0,5	0,1	0,05	0,025
f [kHz]	0,0943	0,204	1,26	3,17	8,01
T [ms]	10,6	4,90	0,794	0,315	0,125

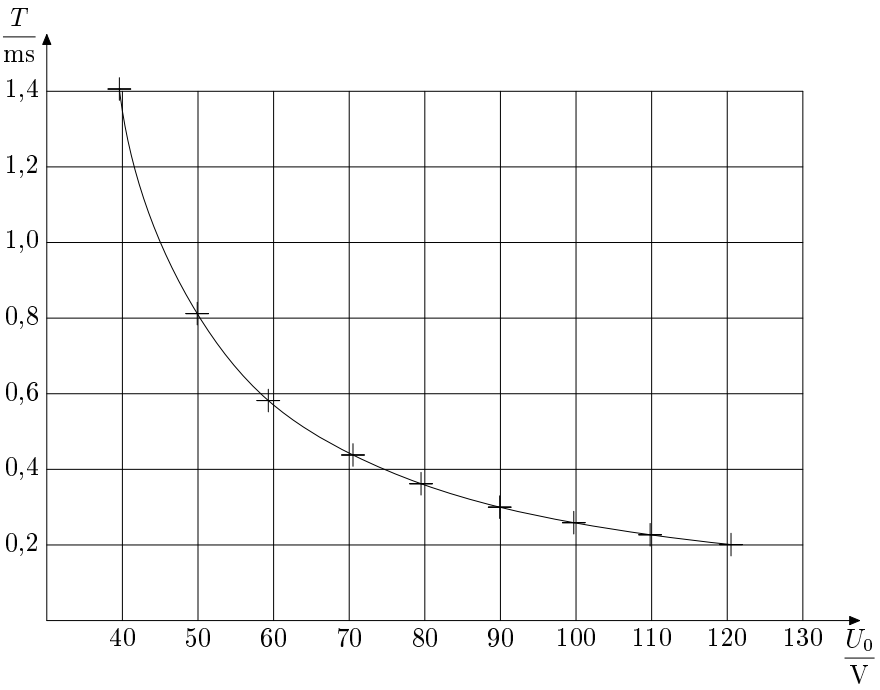
Tabulka 4

U_0 [V]	39,6	49,9	59,3	70,5	79,5	89,9	99,7	109,8	120,5
f [kHz]	0,711	1,231	1,717	2,283	2,760	3,333	3,864	4,405	4,985
T [ms]	1,406	0,812	0,582	0,438	0,362	0,300	0,259	0,227	0,201
U_{B0} [V]	31	30	30	29	29	29	29	28,5	28,5
U_{zh} [V]	9	10	11	11	11,5	12	12	12	12,5
t_1 [ms]	1,498	0,821	0,590	0,425	0,351	0,291	0,254	0,218	0,189

Tabulka 5

krátké době vybíjení odpovídat hodnotě t_1 ze vztahu (4). Tato hodnota je spolu s naměřenými uvedena v tabulce 5. Frekvenci kmitů jsem v tomto případě měřil pouze čítačem.

Teoretické hodnoty (mimo první) se od změřených liší o méně než 5%. V rámci výše probíraných chyb se s naměřenými dobře shodují ve všech případech.



Graf 3 – závislost periody kmitů na napětí zroje

Diskuze: Podle katalogových údajů z [2] má diak KR 105 hodnotu spínacího napětí $U_{B0} = 26 \pm 4\,\mathrm{V}$ a symetrie charakteristiky je lepší než 5 V. Mnou naměřené hodnoty spínacího napětí jsou v horní části rozsahu, ale v rámci chyby odpovídají katalogovým. Pokles napětí ΔU je při proudu 10 mA podle katalogu minimálně 4 V. Naměřené hodnoty jsou vyšší i při proudu 6 mA.

Při měření relaxačních kmitů byla doba vybíjení kondenzátoru mimo nejvyšší frekvence zanedbatelná. Změřené hodnoty periody a spočítaný čas nabíjení kondenzátoru t_1 se dobře shodují. Rozdíl hodnot v tabulce 3 je menší než 10%, což je v rámci chyby měření. Nenulová doba vybíjení kondenzátoru je vidět na konci tabulky, kde je už naměřená perioda vyšší než spočítaný čas nabíjení.

Při měření závislosti periody na napětí zdroje se teoretické hodnoty spočítané podle vztahu (4) dobře shodují s naměřenou periodou, jak je vidět v tabulce 5. Rozdíl je v jednotkách procent a dá se zahrnout pod chyby měření.

Měnící se hodnota zhášecího napětí souvisí v prvním případě se změnou kapacity a tím i proudu procházejícího diakem během vybíjení. Při změně napětí zdroje se zhášecí napětí mění v závislosti na frekvenci méně výrazně. To odpovídá tomu, že celkový náboj prošlý diakem při vybíjení teď závisí pouze na napětí U_{B0}, při kterém diak sepne, které se mění mnohem méně, než kapacita kondenzátoru v předchozím měření.

Porovnáním hodnot v tabulce 3 a 5 je vidět, že spínací napětí diaku není konstantní a navíc se mění v obou případech v závislosti na frekvenci přibližně stejně. Příčinu, proč spínací napětí není konstantní neumím určit a tedy ani teoreticky určit jeho hodnoty.

ZÁVĚR: Naměřené charakteristiky diaku odpovídají v rámci chyb měření tabulkovým hodnotám podle [2]. Voltampérová charakteristika diaku po sepnutí pro obě polarity zapojení je v grafu 1.

Zjištěná závislost periody relaxačních kmitů na časové konstantě obvodu τ je vynesena v grafu 2 (křivka T) a dobře se shoduje s hodnotou spočítanou podle vztahu (4) po dosazení naměřených hodnot napětí. Závislost periody na napětí zdroje je v grafu 3 a také dobře odpovídá hodnotám vypočítaným podle (4).

Měnící se zhášecí napětí diaku odpovídá změně kapacity kondenzátoru a změně spínacího napětí. Příčinu změn spínacího napětí s frekvencí kmitů neumím určit.

LITERATURA:

[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989
[2]