

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

## PRAKTIKUM II

Úloha č.: .....XIV.....

Název: Relaxačné kmity

Vypracoval:.... **Viktor Babjak** ... stud. sk. .. F 11 .. dne.....7. 11. 2005

Odevzdal dne: ..... vráceno: .....

Odevzdal dne: ..... vráceno: .....

Odevzdal dne: .....

Posuzoval: **Nedbal**.....dne ..... výsledek klasifikace .....1-.....

Připomínky:

V-A charakteristika: nie je len súborom diskretných experimentálne získaných bodov (t.j. myslel preloženie bodov v grafe 1)

V závere je podčiarknutá veta: „...so znižujúcou hodnotou časovej konštanty  $\tau$  sa zväčšuje vybíjacia doba  $t_2$ .“

## Pracovné úlohy:

1. Premerajte voltampérovú charakteristiku diaku a z nej určite
  - a. spínacie napätie pri oboch polaritách  $U_{B01}$  a  $U_{B02}$
  - b. pokles napätia na diaku pri prekročení spínacieho napätia  $\Delta U$  (pri oboch polaritách)
  - c. tzv. symetriu diaku  $|U_{B01} - U_{B02}|$

Všetky určené hodnoty porovnajte s katalógovými.

2. Zapojte diak ako zdroj relaxačných kmitov a zmerajte závislosť periódy týchto kmitov  $T$  na časovej konštante  $t = RC$  obvodu pri konštantnom napätí zdroja (cca. 40 V). Kmitočet relaxačných kmitov merajte bežným čítačom, pri niekoľkých rádovo rozdielnych hodnotách takisto priamo osciloskopom a porovnaním s kmitočtom generátora (pomocou Lissajousových obrazcov). V referáte porovnajte presnosť použitých meracích metód merania kmitočtu.
3. Zmerajte závislosť frekvencie kmitov  $f$  na napätí zdroja  $U_0$ . Pomocou osciloskopu určite z amplitúd relaxačných kmitov hodnoty zhášacieho napätia  $U_{zh}$  a namerané hodnoty overte výpočtom.

## Teoretická časť:

### Diak

Diak je spínací trojvrstvový symetrický polovodičový systém (P-N-P) s dvoma elektródami. Ide o zapojenie tranzistoru so spoločným emitorom s nulovým prúdom bázy, ktorý pracuje v spínacom stave na rozhraní aktívnej oblasti a oblasti prierazu. Ak k diaku privedieme napätie menšie ako je spínacie napätie  $U_{B0}$ , diakom nebude prakticky pretekať prúd. Keď napätie na diaku prekročí hodnotu spínacieho napätia  $U_{B0}$ , dochádza k lavínovému prierazu prechodu zapojeného v závernom smere (diakom začne pretekať prúd) a napätie na diaku poklesne o  $\Delta U$ , tj. zmenší sa jeho odpor. S rastúcim prúdom sa hodnota  $\Delta U$  zväčšuje. Charakteristika diaku znázornená na obrázku 1 je takmer symetrická, odchýlky od symetrie sú spôsobené technológiou výroby. Symetriou charakteristiky diaku nazývame hodnotu, vid' [1]

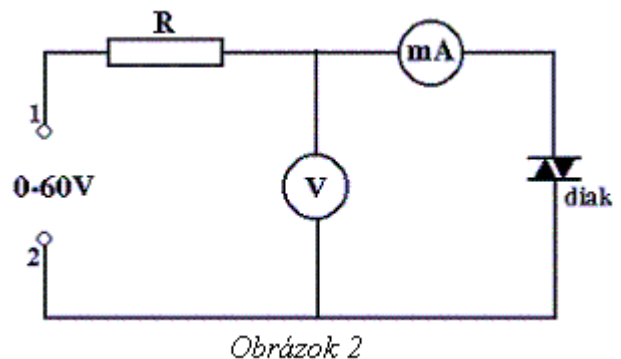
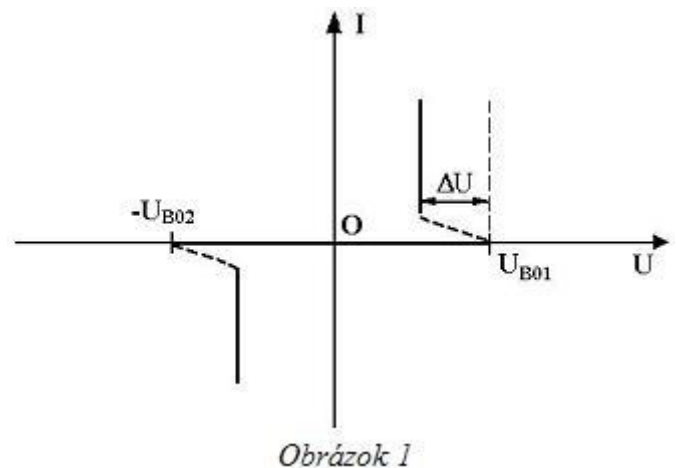
$$|U_{B01} - U_{B02}|, \quad (1)$$

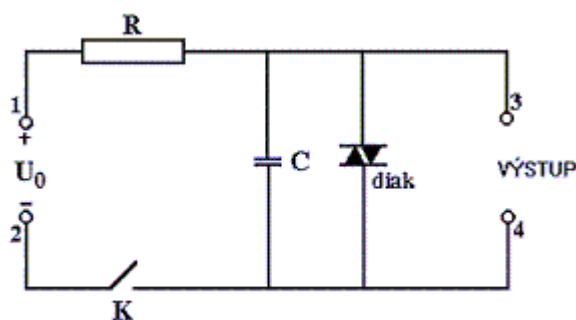
kde  $U_{B01}$  a  $U_{B02}$  je spínacie napätie pri oboch polaritách.

### Voltampérová charakteristika

Použijeme zapojenie na obrázku 2. Na svorky 1, 2 je pripojený regulovateľný zdroj jednosmerného napätia. Odpor  $R$  musí byť nastavený na hodnotu najmenej  $3 \text{ k}\Omega$ . Zvyšujeme napätie na diaku až do okamžiku, keď dôjde k prierazu, čo sa prejaví zväčšením prúdu v obvode a poklesom napätia na diaku. Charakteristiku premeriame zvyšovaním napätia zdroja  $U_0$ . Na prístrojoch odčítame hodnoty prúdu a napätia, pričom dbáme na to, aby sme neprekročili stratový výkon  $P = 300 \text{ mW}$ . Zároveň nesmieme prekročiť prúd odporovou dekádou nad hodnotu stanovenú výrobcom, vid' [1].

### Relaxačné kmity



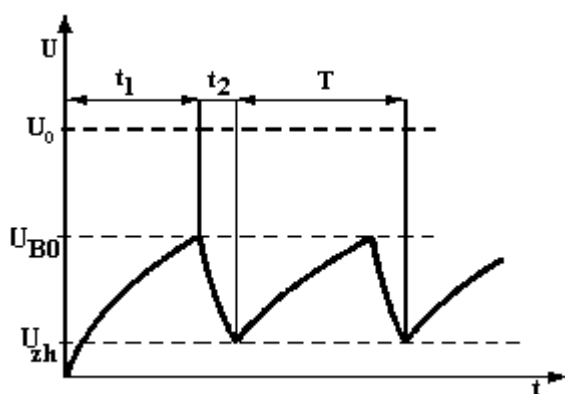


Obrázok 3

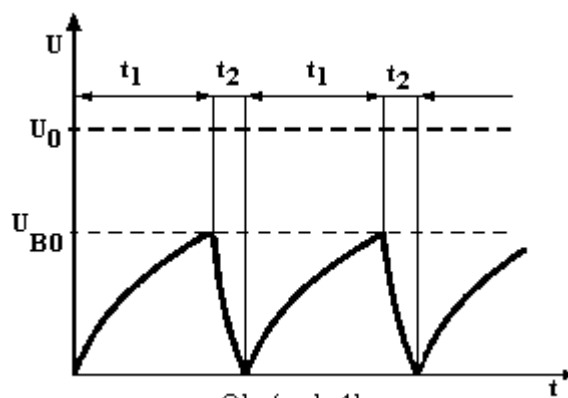
Diak môžeme použiť na generovanie relaxačných kmitov. Schéma zapojenia je na *obrázku 3*. Paralelne k diaku je pripojený kondenzátor  $C$  a oba tieto prvky sú cez odpor  $R$  pripojené ku zdroju  $U_0 > U_{B0}$ . Po uzavretí obvodu, začne na kondenzátore napätie podľa vzťahu, vid' [1]

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

Ak napätie na kondenzátore dosiahne hodnotu  $U = U_{B0}$  (v čase  $t_1$ ), dôjde k zopnutiu diaku, diakom potečie prúd a kondenzátor sa vybije až na hodnotu zhášacieho napätia  $U_{zh}$ , pri ktorom prestane diakom tiecť prúd (*obrázok 4a*). Potom sa kondenzátor odznova nabíja a celý dej sa opakuje. V ideálnom prípade (keď by odpor zopnutého diaku bol nulový) by hodnota napätia  $U_{zh}$  bola nulová (*obrázok 4b*).



Obrázok 4a



Obrázok 4b

Napätie  $U_{zh}$  závisí na veľkosti prúdu, ktorý tečie diakom v zopnutom stave. Tento prúd je časovo závislý, takže i pri známej charakteristike diaku nie je jednoduché vopred určiť  $U_{zh}$ .

Časový priebeh nabíjacieho napätia na kondenzátore je daný vzťahom

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

ktorý platí vtedy, keď odpor nezopnutého diaku pokladáme za nekonečne veľký. Napätie  $U$  sa nezvyšuje až do hodnoty  $U_0$ , ale len do hodnoty  $U_{B0}$ , pri ktorom diak zopne. Z toho môžeme vypočítať závislosť nabíjacej doby  $t_1$  na hodnote časovej konštanty  $t = RC$  a na napätí zdroja  $U_0$ . Uvažujeme jediný kmit, ktorý začne v čase  $t = 0$ , keď  $U = U_{zh}$ , napätie na diaku sa potom zvyšuje podľa vzťahu (3) až do doby, v ktorej  $U = U_{B0}$ . Príslušný čas bude  $t_1$ , t.j.

$$U_{B0} - U_{zh} = (U_0 - U_{zh}) \left( 1 - e^{-\frac{t_1}{RC}} \right). \quad (4)$$

Z rovnice (4) určíme  $t_1$

$$t_1 = RC \ln \left( \frac{U_0 - U_{zh}}{U_0 - U_{B0}} \right). \quad (5)$$

Ak by odpor diaku v zopnutom stave  $r_s$  bol nulový, bola by nulová i doba vybíjania  $t_2$  a  $t_1$  by bolo rovné dobe kmitu  $T$ . Tento predpoklad nie je všeobecne splnený, avšak pri väčšine meraní bude  $t_2 \approx t_1$  a dobu  $t_1$  môžeme pokladať za periódu kmitov  $T$ .

### Výsledky merania:

Použité meracie prístroje:

- miliampérmeter
  - rozsah: 15 mA
- voltmeter
  - rozsah: 200 V

### Voltampérová charakteristika diaku

Použil som zapojenie na obrázku 2. Na odporovej dekáde som nastavil odpor  $R = 3 \text{ k}\Omega$ . Chybu určenia napätia na diaku odhadujem na 0,1 V; chybu určenia prechádzajúceho prúdu odhadujem na 0,1 A.

Na určenie spínacieho napätia som použil funkciu MAX na voltmetri, pomocou ktorej môžem určiť maximálne napätie registrované voltmetrom počas merania. Namerané hodnoty pre obe polarities sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 – Spínacie napätie diaku pre obe polarity

kladný smer	$U_{B01} [V]$	32,7	32,9	32,9	32,8	32,8
záporný smer	$U_{B02} [V]$	32,5	32,6	32,5	32,5	32,6

Výsledné spínacie napätie diaku pre obe polarities som určil ako aritmetický priemer nameraných hodnôt; ich chybu som určil ako kvadratický priemer smerodajnej odchýlky aritmetického priemeru a chyby voltmetra, vid' [2].

- spínacie napätie pre kladný smer:  $U_{B01} = (32,8 \pm 0,1) \text{ V}$
- spínacie napätie pre záporný smer:  $U_{B02} = (32,5 \pm 0,1) \text{ V}$

Z týchto hodnôt som podľa (1) určil symetriu charakteristiky diaku.

- symetria diaku:  $|U_{B01} - U_{B02}| = (0,3 \pm 0,2) \text{ V}$

Pre obe polarities zapojenia som premeral voltampérovú charakteristiku diaku. Namerané hodnoty pre obe polarities sú uvedené v tabuľke 2; tieto hodnoty sú znázornené v grafe 1.

Tabuľka 2 – Namerané hodnoty voltampérovej charakteristiky

kladný smer		záporný smer	
$U [V]$	$I [mA]$	$U [V]$	$I [mA]$
21,9	10,0	21,8	10,1
22,0	8,5	21,9	8,6
22,1	7,1	22,0	8,0
22,2	6,0	22,1	7,0
22,3	5,1	22,2	5,9
22,4	4,9	22,3	5,0
22,5	4,0	22,4	3,9
22,6	3,3	22,5	3,4
22,7	2,9	22,6	3,0
22,8	2,4	22,7	2,5
22,9	2,0	22,8	2,0
23,0	1,7	22,9	1,5
23,2	1,2	23,2	1,0
23,4	0,8	23,5	0,6
23,9	0,4	23,8	0,4
32,7	0,0	32,6	0,0

Z týchto hodnôt som určil pokles napätia na diaku pri prúde 10 mA.

- pokles napätia  $\Delta U$  pre kladný smer:  $\Delta U_1 = 10,8 V$
- pokles napätia  $\Delta U$  pre záporný smer:  $\Delta U_2 = 10,8 V$

Namerané hodnoty som porovnal s katalógovými hodnotami pre diak.

- spínacie napätie:  $U_{B0} = (32 \pm 4) V$
- pokles napätia:  $\Delta U_{\min} = 4 V$  pri prúde  $I = 10 mA$
- symetria diaku:  $|U_{B01} - U_{B02}| < 5 V$

T.j. namerané a vypočítané hodnoty sa zhodujú s katalógovými hodnotami.

*Závislosť periódy  $T$  relaxačných kmitov na časovej konštante  $t = RC$  obvodu*

Použil som zapojenie na obrázku 3. Meranie som prevádzal pri konštantnom napätí zdroja  $U_0 = 40 V$ , konštantnom odpore  $R = 2 k\Omega$  a premennej kapacite  $C$ . Frekvenciu  $f$  relaxačných kmitov som meral troma rôznymi spôsobmi.

1. čítačom frekvencie  $f$  (periódu relaxačných kmitov určím ako prevrátenú hodnotu frekvencie)
2. na osciloskope som určil dobu  $T$  medzi dvoma kmitmi
3. stabilný zdroj harmonického striedavého napätia som pripojil na horizontálnu os osciloskopu a na vertikálnej osi sa zobrazovalo napätie na diaku, tým dochádzalo ku skladaniu dvoch kolmých kmitaní. Pri vhodnom nastavení frekvencie generátora vzniknú na obrazovke Lissajousove obrazce. Z pomeru počtu priesečníkov vo vertikálnom a horizontálnom smere a podľa frekvencie generátora zobrazovanej na čítači frekvencie som určil frekvenciu relaxačných kmitov (na základe nej som určil periódu relaxačných kmitov)

Chybu určenia frekvencie na čítači vzhľadom k meranému rozsahu odhadujem na 1 % z meranej hodnoty (t.j. rovnakú chybu uvažujem aj pre vypočítanú periódu relaxačných kmitov). Namerané a vypočítané hodnoty sú uvedené v tabuľke 3 a znázornené v grafe 2.

*Tabuľka 3 – Závislosť doby kmitu  $T$  na kapacitu pri konštantnom odpore  $R=2 k\Omega$*

$C [\mu F]$	$f_{Lis} [Hz]$	$T_{Lis} [ms]$	$f_{cit} [Hz]$	$T_{cit} [ms]$	$T_{osc} [ms]$
1,00	564,4	1,77	568,9	1,76	1,74
0,90	594,5	1,68	610,0	1,64	1,64
0,80	668,4	1,50	684,7	1,46	1,47
0,70	771,4	1,30	760,5	1,31	1,30
0,60	997,2	1,00	991,5	1,01	1,10
0,50	1115,8	0,90	1112,3	0,90	0,89
0,40	1307,5	0,76	1305,8	0,77	0,75
0,30	1725,0	0,58	1740,5	0,57	0,58
0,20	2609,6	0,38	2654,8	0,38	0,36
0,10	5040,0	0,198	5170,9	0,193	0,195
0,09	5952,0	0,168	6100,0	0,164	0,162
0,08	6631,0	0,151	6700,0	0,149	0,142
0,07	7479,0	0,134	7470,0	0,134	0,127
0,06	8580,0	0,117	8613,1	0,116	0,110
0,05	10004,0	0,100	10183,0	0,098	0,094
0,04	11780,0	0,085	12017,0	0,083	0,079
0,03	14482,0	0,069	14928,0	0,067	0,064
0,02	18590,0	0,0538	18840,0	0,0531	0,0517
0,01	25680,0	0,0389	25827,0	0,0387	0,0372

*Závislosť frekvencie  $f$  relaxačných kmitov na napäté zdroja  $U_0$*

Použil som zapojenie na obrázku 3. Meranie som prevádzal pri konštantnom odpore  $R = 10 k\Omega$  a konštantnej kapacite  $C = 1 mF$  a premennom napätí zdroja  $U_0$ . V tejto úlohe som frekvenciu meral dvoma spôsobmi (pomocou čítača a osciloskopu). Chybu určenia frekvencie uvažujem rovnakú ako

v predchádzajúcej úlohe. Napätie zdroja som určoval podľa ukazovateľa na danom zdroji; chybu odhadujem na 1 V.

Zhášacie napätie  $U_{zh}$  som určoval z obrazovky osciloskopu ako rozdiel napätia medzi časovou osou a minimom meraných kmitov – pri tomto meraní jeden dielik na obrazovke osciloskopu predstavoval 5 V; chybu určenia napätia  $U_{zh}$  odhadujem na 1 V.

Namerané hodnoty sú uvedené v *tabuľke 4* a znázornené v *grafe 3*. V *tabuľke 4* sú uvedené aj teoretické hodnoty napätia  $U_{zh}$  dané vzťahom (4). Vzhľadom k zapojeniu ako spínacie napätie uvažujem  $U_{B0} = U_{B01}$ ; odpor a kapacitu považujem za určené presne.

*Tabuľka 4 – Závislosť frekvencie  $f$  relaxačných kmitov na napätí zdroja  $U_0$*

$U$ [V]	$U_{zh}$ [V]	$U_{teo}$ [V]	$f_{cit}$ [Hz]	$T_{cit}$ [ms]	$T_{osc}$ [ms]	$f_{osc}$ [Hz]
40	11,5	19,8	96,9	10,32	10,10	99,0
45	12,0	17,7	123,9	8,07	7,90	126,6
50	12,0	16,9	152,6	6,55	6,30	158,7
55	12,0	16,6	182,0	5,49	5,48	182,5
60	12,0	16,2	210,3	4,76	4,81	207,9
65	12,0	16,4	243,0	6,99	4,12	242,7
70	12,5	16,4	273,6	3,65	3,65	274,0
75	12,5	16,4	303,8	3,29	3,28	304,9
80	12,5	16,2	332,7	3,01	3,04	328,9
85	13,0	16,6	369,5	2,71	2,72	367,6
90	13,0	16,6	401,3	2,49	2,51	398,4
95	13,0	16,7	435,3	2,30	2,30	434,8
100	13,0	16,8	466,8	2,14	2,13	469,5
105	13,0	16,9	502,1	1,99	1,99	502,5
110	13,0	16,8	533,1	1,88	1,86	537,6

### Diskusia výsledkov:

#### *Voltampérová charakteristika diaku*

Namerané hodnoty spínacieho napätia ( $U_{B01} = (32,8 \pm 0,1) V$ ,  $U_{B02} = (32,5 \pm 0,1) V$ ), poklesu napätia ( $\Delta U = 10,8 V$ ) a symetrie diaku ( $|U_{B01} - U_{B02}| = (0,3 \pm 0,2) V$ ) som porovnal s katalógovými hodnotami ( $U_{B0} = (32 \pm 4) V$ ,  $\Delta U_{min} = 4 V$  pri prúde  $I = 10 mA$ ,  $|U_{B01} - U_{B02}| < 5 V$ ) – t.j. namerané hodnoty sa dobre zhodujú s katalógovými hodnotami. Veľká chyba pri určení symetrie diaku je spôsobená tvarom vzťahu (1), v ktorom odčítam dve blízke hodnoty, kým chybu určujem podľa [2] ako súčet ich absolútnych chýb.

Pri meraní spínacieho napätia je potrebné meniť napätie zdroja pomaly, pretože voltmeter (ak používame funkciu MAX) potrebuje určitý čas na to, aby zaregistroval dané napätie. Z toho vyplýva, že spínacie napätie môže byť vyššie ako namerané napätie.

V *grafe 1* je znázornená nameraná voltampérová charakteristika diaku, ktorá dobre zodpovedá charakteristike znázornenej na *obrázku 1*.

#### *Závislosť periódy $T$ relaxačných kmitov na časovej konštante $t = RC$ obvodu*

Závislosť doby relaxačných kmitov na časovej konštante  $\tau$  som meral troma rôznymi spôsobmi – pomocou čítača frekvencie, osciloskopu (priamo som odčítal periódu kmitov) a pomocou Lissajousových obrazcov (odčítal som frekvenciu generátora).

Chyba merania čítačom frekvencie je hlavne daná nestabilitou frekvencie obvodu – v priebehu jedného merania sa menila hodnota frekvencie na čítači (hodnota frekvencie zobrazovaná na čítači sa vytvára ako priemer hodnôt zaznamenaných za 1 s). Pri meraní osciloskopom je chyba daná presnosťou osciloskopu a takisto je spôsobená aj označovaním dvoch bodov na osciloskope – ich časový rozdiel predstavuje periódu relaxačných kmitov. Chyba pri meraní pomocou Lissajousových obrazcov je daná nestabilitou frekvencie generátora.

Z týchto troch metód určovania frekvencie je najpresnejšia metóda Lissajousových obrazcov – Lissajousové obrazce môžu vzniknúť len pri presnom pomere frekvencie generátora a frekvencie v obvode. Na obrazovke osciloskopu sa zobrazovala situácia v danom časovom okamihu. Po nastavení obrazca na obrazovke osciloskopu sa obraz hneď začal meniť – pohybovať (frekvenciu generátora som nemenil); je to spôsobené nestabilitou frekvencie generátora, ale takisto nestabilitu spôsobuje diak (keď som trochu zatlačil na diak, tak obrazec na osciloskope sa začal meniť rýchlejšie). Meranie frekvencie pomocou čítača je presnejšie ako meranie pomocou osciloskopu.

Z merania na osciloskope (z obrazcov na obrazovke) vyplýva, že so znižujúcou hodnotou časovej konštanty  $\tau$  sa zväčšuje vybíjacia doba  $t_2$ .

Hodnoty nameraných frekvencií sa menili v priebehu merania (napr. pri kapacite  $1 \mu F$  som na začiatku merania nameril frekvenciu  $537,7 \text{ Hz}$ , kým neskôr som nameril hodnotu  $568,9 \text{ Hz}$ ). T.j. z toho vyplývajú aj väčšie odchýlky medzi frekvenciami nameranými pomocou čítača a Lissajousových obrazcov – *tabuľka 3* (najprv som premeril frekvenciu pomocou čítača a osciloskopu a až potom som meral frekvenciu pomocou Lissajousových obrazcov).

Nameraná závislosť je zobrazená v *grafe 2*. Nameranými bodmi som preložil priamky; lineárnu závislosť predpokladám podľa vzťahu (5).

*Závislosť frekvencie  $f$  relaxačných kmitov na napätí zdroja  $U_0$*

Nameraná závislosť je zobrazená v *grafe 3*. Z toho vyplýva, že daná závislosť je lineárna.

V tejto úlohe som určoval pomocou osciloskopu zhášacie napätie. Namerané hodnoty sú znázornené v *tabuľke 3*. Podľa (4) som určil aj teoretické hodnoty zhášacieho napätia. Namerané a vypočítané hodnoty sa odlišujú o 3 – 4 V, čo je spôsobené nepresným určením napätia na osciloskope, no prejavuje sa tu aj chyba určenia spínacieho napätia, ktoré vystupuje vo vzťahu (4). Zhášacie napätie závisí na napätí zdroja a takisto aj na prúde pretekajúcim diakom, viď [1].

### Záver:

Premeral som voltampérovú charakteristiku diaku (táto charakteristika je znázornená v *grafe 1*).

Z nameraných hodnôt som určil spínacie napätie pre obe polarities a hodnotu symetrie diaku.

- spínacie napätie  $U_{B01}$ :  $U_{B01} = (32,8 \pm 0,1) \text{ V}$
- spínacie napätie  $U_{B02}$ :  $U_{B02} = (32,5 \pm 0,1) \text{ V}$
- pokles napätia  $\Delta U$ :  $\Delta U = 10,8 \text{ V}$
- symetria diaku:  $|U_{B01} - U_{B02}| = (0,3 \pm 0,2) \text{ V}$

Nameraným hodnotám zodpovedajú katalógové hodnoty:

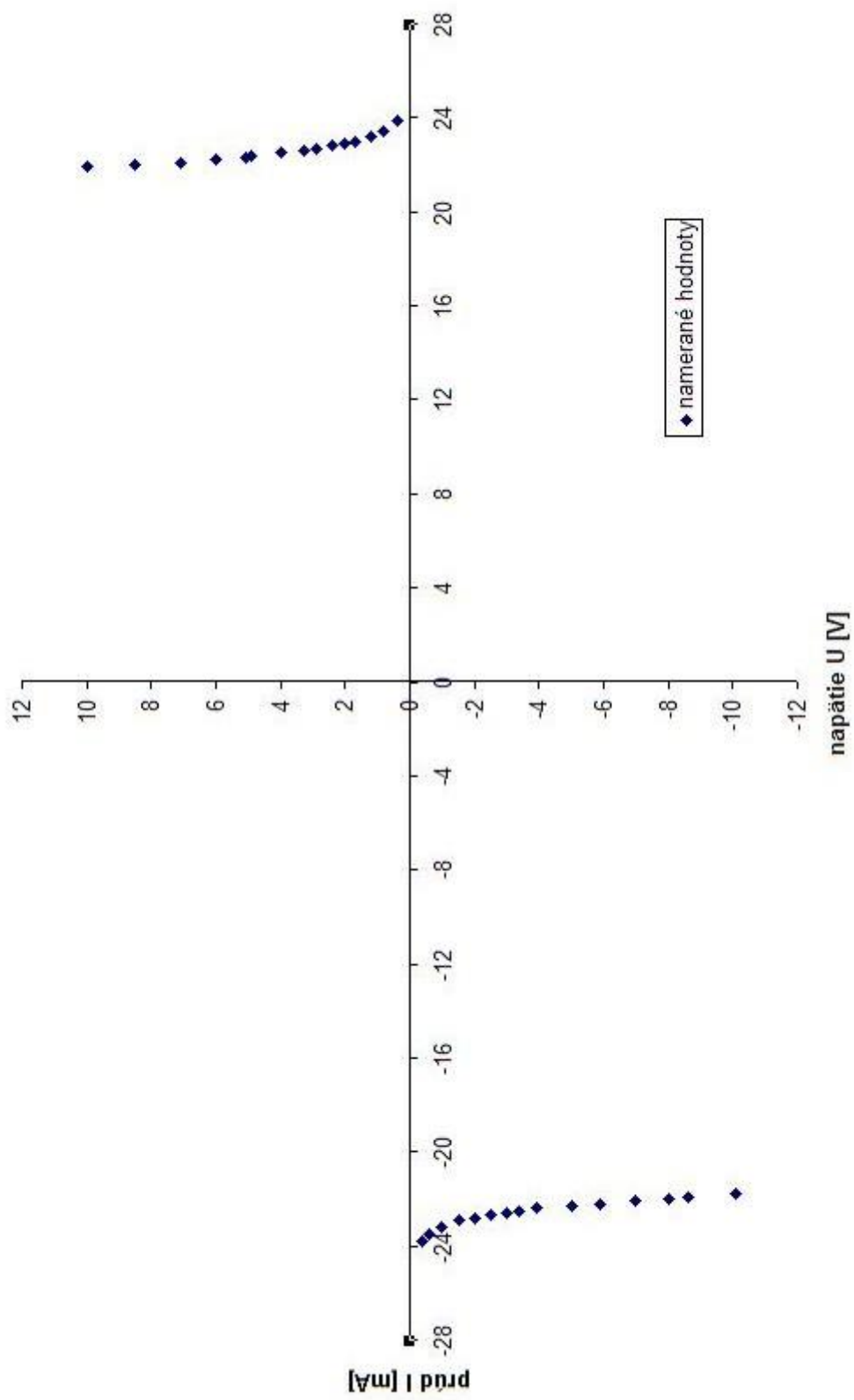
- spínacie napätie  $U_{B0kat}$ :  $U_{B0} = (32 \pm 4) \text{ V}$
- pokles napätia  $\Delta U_{kat}$ :  $\Delta U_{min} = 4 \text{ V}$  pri prúde  $I = 10 \text{ mA}$
- symetria diaku:  $|U_{B01} - U_{B02}| < 5 \text{ V}$

Premeral som závislosť periódy  $T$  relaxačných kmitov na časovej konštante  $t = RC$  obvodu pri konštantnom napätí zdroja (*tabuľka 3* a *graf 2*) a závislosť frekvencie  $f$  relaxačných kmitov na napätí zdroja  $U_0$  (*tabuľka 4* a *graf 3*). Nameranú periódu kmitov  $T$  som porovnal s teoretickou hodnotou danou vzťahom (5).

### Literatúra:

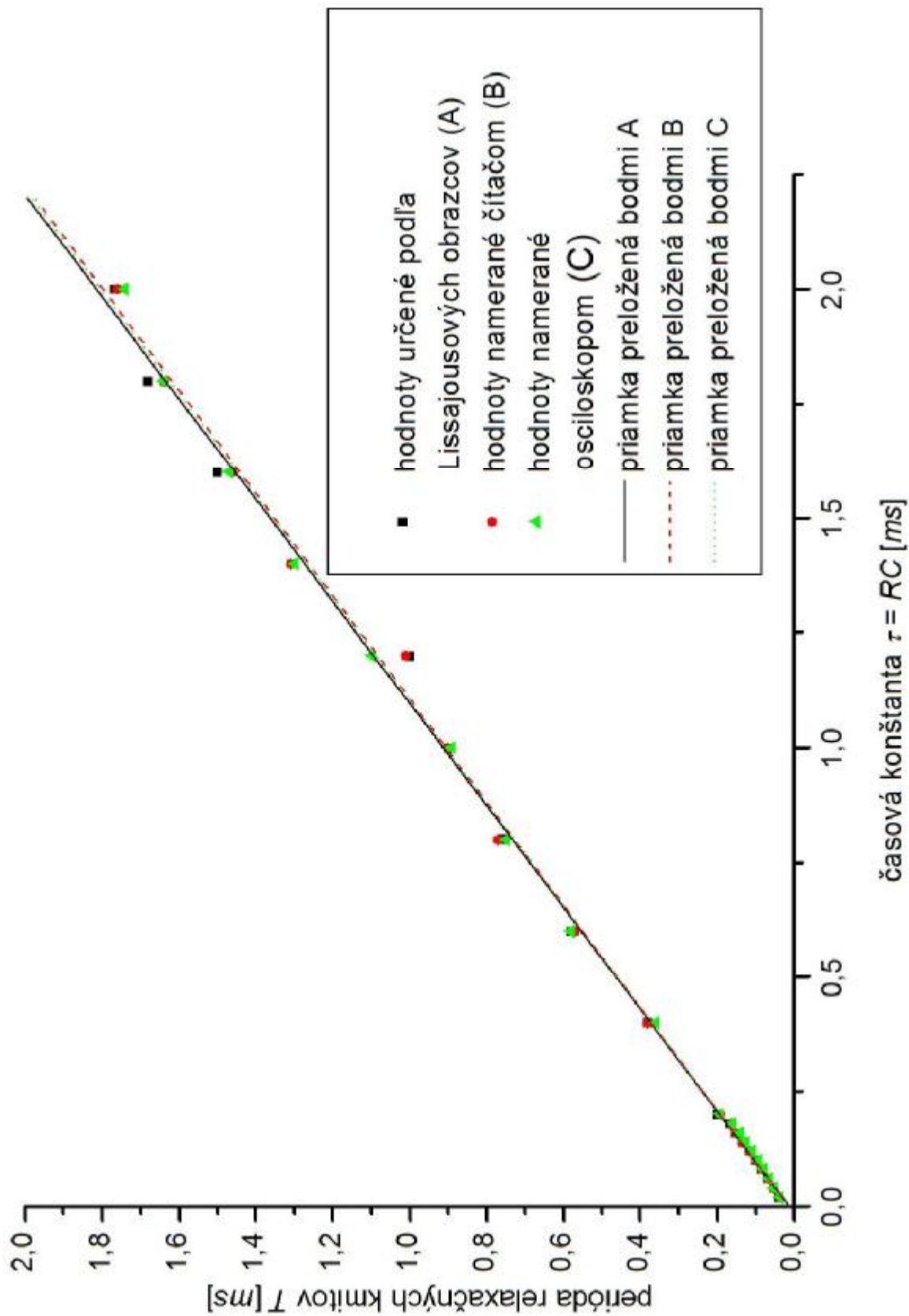
- [1] Bakule, J.; Štenberk: Fyzikálne praktikum II; SPN; Praha 1989  
 [2] English, J.; Zpracování výsledků fyzikálních měření, LS 1999/2000

Graf 1 - Voltampérová charakteristika diaku





Graf 2 - Závislosť periódy  $T$  relaxačných kmitov na časovej konštante  $\tau = RC$



Graf 3 - Závislosť frekvencie relaxačných kmitov na napätí zdroja  $U_0$

