

Pracovní úkol

1. Proměřte voltampérovou charakteristiku diaku a z ní určete:
 - (a) spínací napětí U_{BO} při obou polaritách.
 - (b) pokles napětí ΔU na diaku při překročení spínacího napětí (při obou polaritách)
 - (c) tzv. *symetrii* diaku $|U_{BO1} - U_{BO2}|$

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.

Teoretický úvod

Diak je spínací součástka sestávající ze tří polovodičových vrstev typu P, N a P, následkem čehož je symetrická. Její charakteristika je schematicky na Obrázku 1. Diak má ve výchozím stavu velmi velký odpor (jako dioda v závěrném směru). Při zvyšování napětí je tak proud prakticky nulový až do tzv. *spínacího* napětí U_{BO} , kdy dojde k průrazu a odpor se skokově zmenší o několik řádů. Zvláštností je záporný dynamický odpor v této otevřené oblasti. Pokud proud diakem v průrazu poklesne pod určitou kritickou mez, přejde tento zpět do zavřeného stavu.

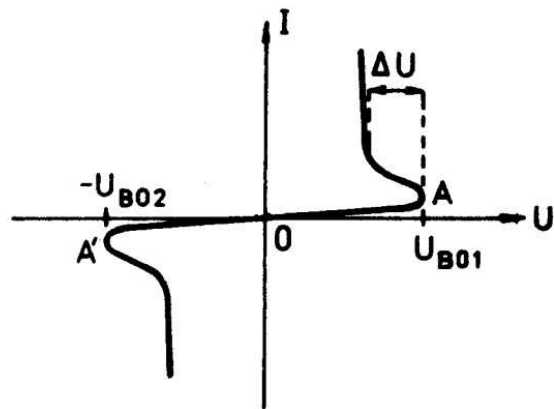
Pokud diak zapojíme do obvodu na Obrázku 2, dostaneme tzv. *relaxační* kmitu. Diak se zde periodicky přepíná mezi oběma stavy. Když je zavřený, kondenzátor se nabíjí, čímž roste napětí na diaku. Při překročení spínacího napětí se kondenzátor přes diak vybije, po čemž se diak opět vrátí do zavřeného stavu a vše se opakuje.

Časová závislost napětí na diaku je na Obrázku 3. U_0 je zde napětí na zdroji a U_{zh} tzv. *zhášecí* napětí, při kterém diak přechází do zavřeného stavu.¹ Perioda kmitů je zřejmě $T = t_1 + t_2$.

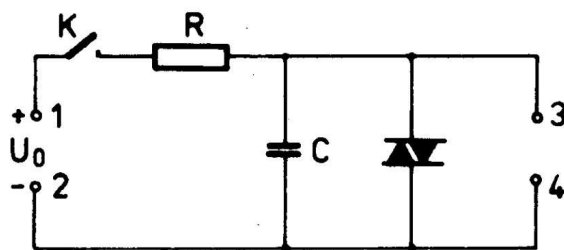
V [1] je odvozeno, že pokud $t_2 \ll t_1$, platí

$$T = RC \ln \frac{U_0 - U_{zh}}{U_0 - U_{BO}}. \quad (1)$$

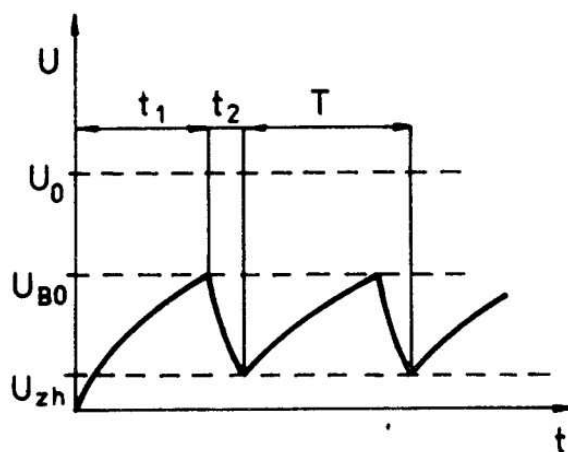
¹Zhášecí napětí zřejmě nějak závisí na parametrech obvodu, jelikož kritickou veličinou pro přechod z otevřeného do zavřeného stavu diaku není napětí, ale proud.



Obrázek 1: Schematická charakteristika diaku



Obrázek 2: Obvod generující relaxační kmitů



Obrázek 3: Časová závislost napětí na diaku v obvodu relaxačních kmitů

V úloze budeme proměřovat diak KR105, jehož katalogové vlastnosti jsou podle [2] $U_{\text{BO}} = (26 \pm 4) \text{ V}$, $|U_{\text{BO1}} - U_{\text{BO2}}| < 5 \text{ V}$, $\Delta U > 4 \text{ V}$ při 10 mA.

Statistické zpracování

Hodnotu veličiny změřené opakovaně uvádíme jako $\bar{x} \pm \sqrt{s_{\bar{x}}^2 + \delta^2}$, kde

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

a δ je chyba měřidla.

Chybu veličiny $u = f(x_i)$ počítáme ze vztahu

$$\delta_u = \sqrt{\sum_{i,j} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta_{x_i} \delta_{x_j} \rho_{ij}},$$

kde δ_{x_i} jsou chyby veličin x_i a ρ_{ij} je korelační matice. Pro nezávislé veličiny je tedy $\rho_{ij} = \delta_{ij}$.

Při fitování vztahu na naměřená data používáme program *Gnuplot*. Ten aplikuje metodu nejmenších čtverců. V případě lineárního fitování jsou parametry dopočítány algebraicky, v případě nelineárního iterativně. Chyby parametrů fitování mají stejné vlastnosti jako standardní směrodatné odchylky. Vypočítané parametry ovšem nemusí být nezávislé veličiny, je proto nutné s nimi dále pracovat pomocí korelační matice, kterou *Gnuplot* pro každý fit poskytuje.

Výsledky měření

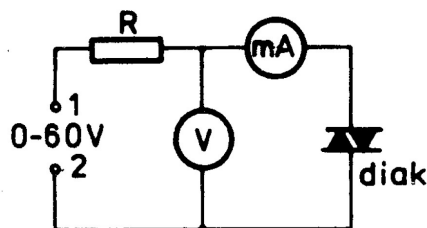
Teplota během měření byla $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Charakteristiku diody jsme proměřovali pomocí obvodu na Obrázku 4. Voltmetr byl digitální s přesností $0.3\% + 1 \text{ dig}$, miliampérmetr analogový třídy přesnosti 0.2 se 120-dílkovou stupnicí. Jako rezistor jsme použili odporovou dekádu s přesností 0.1% nastavenou na $5 \text{ k}\Omega$. Spodním indexem 1 nebo 2 budeme vždy rozlišovat rozdílnou polaritu, ke které se veličina vztahuje.

Nejprve jsme měřili spínací napětí U_{BO} . Napětí na diaku jsme pomalu zvětšovali, dokud proud náhle nevzrostl. Voltmetr byl nastavený na zaznamenání maximálního napětí, takže jsme rovnou mohli odečíst hodnotu spínacího napětí. Měření jsme opakovali několikrát s výsledky

$$U_{\text{BO1}} = (32.8 \pm 0.2) \text{ V}, \quad U_{\text{BO2}} = (32.3 \pm 0.2) \text{ V},$$

z čehož symetrie diaku je

$$|U_{\text{BO1}} - U_{\text{BO2}}| = (0.5 \pm 0.2) \text{ V}.$$



Obrázek 4: Schéma měření charakteristiky diaku

Chyby spínacích napětí jsme nescítali, protože nejsou nezávislé, naopak jsou spíše shodné.

Dále jsme proměřili celou charakteristiku diody. Proud mezi spínacími napětími byl v rámci přesnosti miliampérmetru nulový. Po překročení spínacího napětí jsme proměřovali tuto otevřenou oblast do proudu 15 mA při obou polaritách. Výsledky shrnuje Tabulka 1. Kritický proud, při kterém diak přešel do zavřeného stavu, byl (0.25 ± 0.05) mA pro polaritu 1 a (0.30 ± 0.05) mA pro polaritu 2.

Protože dioda v propustném směru má exponenciální charakteristiku, zkusil jsem proložit i v případě diaku otevřenou oblast exponenciálou s dobrými výsledky. Proložená křivka je všude v mezích chyby měření. Protože mnohem větší přesnost máme v proudu, prokládal jsem ve skutečnosti graf $U(I)$ logaritmickou křivkou. Celá charakteristika je zobrazena na Obrázku 7 (na konci referátu).

Z proložené křivky dostaneme pokles napětí při 10 mA. Je

$$\Delta U_1(10 \text{ mA}) = (10.8 \pm 0.2) \text{ V}, \quad \Delta U_2(10 \text{ mA}) = (10.3 \pm 0.2) \text{ V}.$$

Dále jsme postavili obvod relaxačních kmitů podle Obrázku 2. Použitý kondenzátor byla dekáda s přesností odhadnutou na 5%, rezistor byl stejný jako v předchozí části. Generátor stejnosměrného napětí udával jeho velikost s přesností 1 V.

Jako první jsme měřili závislost periody na časové konstantě při napětí zdroje 41 V. Přesnost určení frekvence pomocí čítače odhaduji na 0.2%, protože hodnota na displeji vždy mírně fluktovala. Měření zachycuje Tabulka 2. Je třeba zmínit, že pravděpodobně díky zahřívání diaku frekvence stabilně rostla, pokud jsme obvod nechali delší dobu sepnutý. Toto vysvětlení podporuje fakt, že pokud jsme k diaku přiblížili žhnoucí žárovku, frekvence začala růst rychleji. Ze vztahu (1) plyne, že perioda závisí na τ přímo úměrně, proto jsme naměřenými daty proložili přímkou. Výsledek ukazuje Obrázek 5.

Pro nejvyšší a nejnižší časovou konstantu jsme také odečetli periodu pomocí osciloskopu s výsledkem (6.5 ± 0.1) ms pro $\tau = 5$ ms a (0.52 ± 0.01) ms pro $\tau = 0.5$ ms.

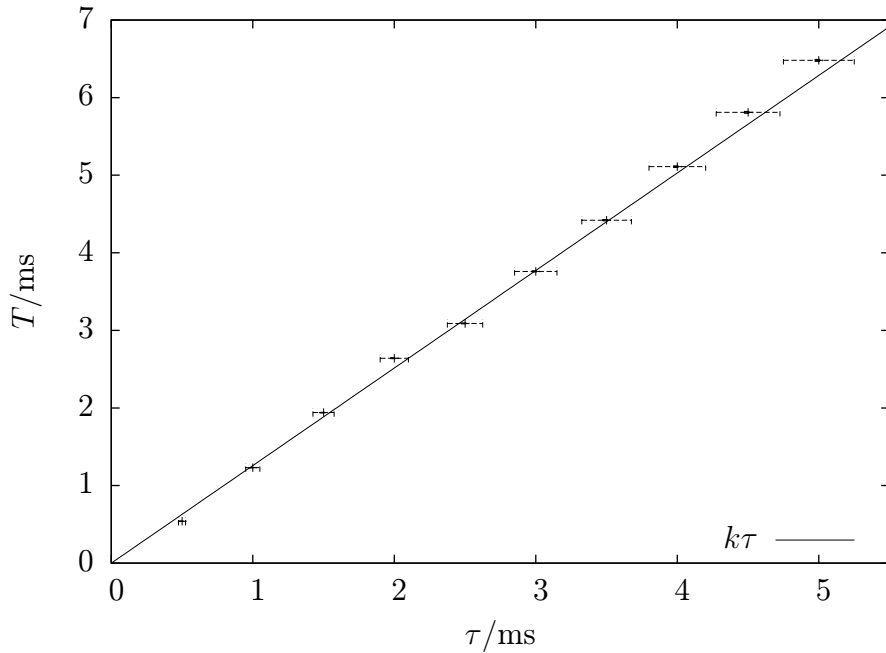
Dále jsme změřili při dvou různých časových konstantách frekvenci relaxačních kmitů srovnáním s frekvencí tónového generátoru pomocí Lissajousových

U_1/V	I_1/mA	U_2/V	I_2/mA
21.8 ± 0.2	15.00 ± 0.05	21.8 ± 0.2	15.00 ± 0.05
21.8 ± 0.2	14.00 ± 0.05	21.8 ± 0.2	14.00 ± 0.05
21.9 ± 0.2	13.00 ± 0.05	21.9 ± 0.2	13.00 ± 0.05
21.9 ± 0.2	12.00 ± 0.05	21.9 ± 0.2	12.00 ± 0.05
22.0 ± 0.2	11.00 ± 0.05	21.9 ± 0.2	11.00 ± 0.05
22.0 ± 0.2	10.00 ± 0.05	22.0 ± 0.2	10.00 ± 0.05
22.1 ± 0.2	9.00 ± 0.05	22.0 ± 0.2	9.00 ± 0.05
22.2 ± 0.2	8.00 ± 0.05	22.1 ± 0.2	8.00 ± 0.05
22.2 ± 0.2	7.00 ± 0.05	22.2 ± 0.2	7.00 ± 0.05
22.3 ± 0.2	6.00 ± 0.05	22.3 ± 0.2	6.00 ± 0.05
22.4 ± 0.2	5.00 ± 0.05	22.4 ± 0.2	5.00 ± 0.05
22.6 ± 0.2	4.00 ± 0.05	22.6 ± 0.2	4.00 ± 0.05
22.7 ± 0.2	3.50 ± 0.05	22.7 ± 0.2	3.00 ± 0.05
22.8 ± 0.2	3.00 ± 0.05	22.9 ± 0.2	2.50 ± 0.05
22.9 ± 0.2	2.50 ± 0.05	23.1 ± 0.2	1.87 ± 0.05
23.1 ± 0.2	1.97 ± 0.05	23.2 ± 0.2	1.50 ± 0.05
23.1 ± 0.2	1.50 ± 0.05	23.4 ± 0.2	1.25 ± 0.05
23.2 ± 0.2	1.25 ± 0.05	23.6 ± 0.2	1.00 ± 0.05
23.4 ± 0.2	1.00 ± 0.05	23.9 ± 0.2	0.75 ± 0.05
23.6 ± 0.2	0.75 ± 0.05	24.1 ± 0.2	0.55 ± 0.05
23.8 ± 0.2	0.55 ± 0.05	24.4 ± 0.2	0.45 ± 0.05
24.0 ± 0.2	0.45 ± 0.05	24.6 ± 0.2	0.35 ± 0.05
24.2 ± 0.2	0.35 ± 0.05	24.8 ± 0.2	0.30 ± 0.05
24.5 ± 0.2	0.25 ± 0.05		

Tabulka 1: Měření charakteristiky diaku

τ/ms	f/Hz	T/ms
5.0 ± 0.3	154.3 ± 0.3	6.48 ± 0.01
4.5 ± 0.3	172.2 ± 0.3	5.81 ± 0.01
4.0 ± 0.2	195.8 ± 0.4	5.11 ± 0.01
3.5 ± 0.2	226.2 ± 0.5	4.421 ± 0.009
3.0 ± 0.2	266.0 ± 0.5	3.759 ± 0.008
2.5 ± 0.2	323.8 ± 0.6	3.088 ± 0.006
2.0 ± 0.1	378.5 ± 0.8	2.642 ± 0.005
1.5 ± 0.1	517 ± 1	1.935 ± 0.004
1.0 ± 0.1	813 ± 2	1.231 ± 0.002
0.5 ± 0.1	1857 ± 4	0.539 ± 0.001

Tabulka 2: Měření závislosti periody na časové konstantně



Obrázek 5: Závislost periody relaxačních kmitů na časové konstantě

τ/ms	f/Hz	
	Lissajous	čítač
5	163 ± 3	166.1 ± 0.3
2.5	358 ± 3	360.3 ± 0.7

Tabulka 3: Měření frekvence pomocí Lissajousových obrazců

obrazců. Výsledky shrnuje Tabulka 3. Pro vyšší τ jsme použili základní frekvenci, pro nižší první harmonickou.

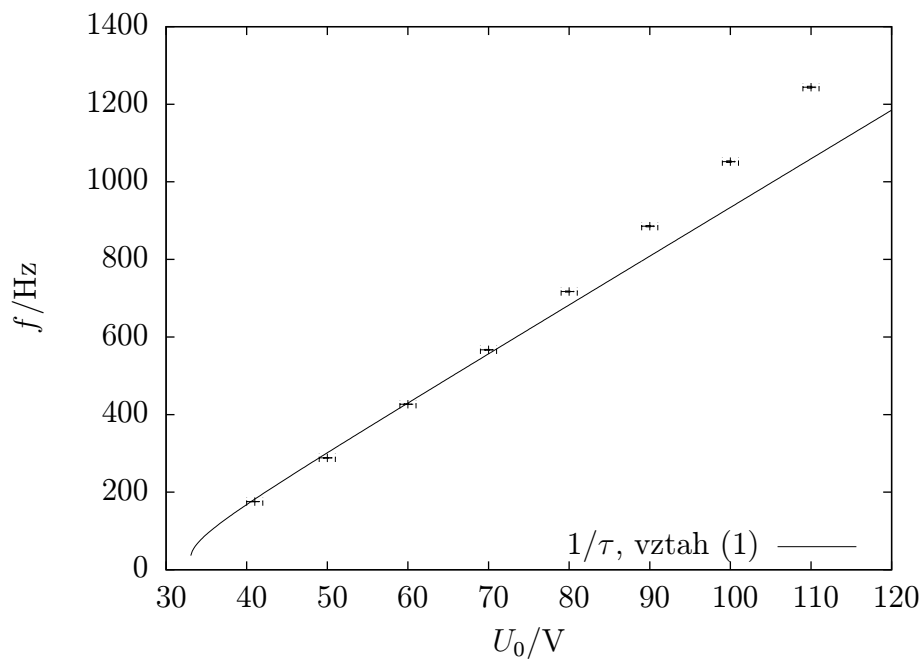
Změřili jsme závislost frekvence relaxačních kmitů na napětí zdroje při časové konstantě 5 ms. Výsledky jsou v Tabulce 4. Z osciloskopu jsme odečetli zhášecí napětí $U_{\text{zh}} = (17 \pm 1) \text{ V}$, které se na celém rozsahu napětí zdroje v rámci chyby neměnilo. Měnilo se ovšem spínací napětí. Data jsou vynesena v Obrázku 6 společně s teoretickou křivkou ze vztahu (1), do kterého jsme dosadili spínací napětí $U_{\text{BO}} = 33 \text{ V}$.

Diskuse výsledků

Naměřená charakteristika odpovídá očekávané, symetrie a pokles napětí odpovídá katalogovým hodnotám. Spínací napětí je mimo rozsah udávaný výrobcem. Jediné vysvětlení, které mě zde napadá, je, že diak ve skutečnosti není KR 105, ale KR 106, který má jmenovité spínací napětí $(32 \pm 4) \text{ V}$, což odpovídá naměřeným

U_0/V	f/Hz	U_{BO}/V
41 ± 1	175.6 ± 0.4	34 ± 1
50 ± 1	288.4 ± 0.6	34 ± 1
60 ± 1	426.7 ± 0.9	34 ± 1
70 ± 1	567 ± 1	33 ± 1
80 ± 1	717 ± 1	32 ± 1
90 ± 1	886 ± 2	32 ± 1
100 ± 1	1052 ± 2	31 ± 1
110 ± 1	1244 ± 2	31 ± 1

Tabulka 4: Měření závislosti frekvence na napětí zdroje



Obrázek 6: Závislost frekvence relaxačních kmitů na napětí zdroje

hodnotám velmi dobře.

Pro proměření charakteristiky v zavřeném stavu bychom potřebovali mnohem citlivější přístroj, pravděpodobně mikroampérmetr. Abychom skutečně ověřili exponenciální charakteristiku v otevřeném stavu, museli bychom pokračovat ve zvyšování proudu na alespoň desetkrát větší hodnoty. K tomu bychom ale potřebovali jinou měřicí metodu, protože např. proud 1 A může podle výrobce procházet diakem maximálně 20 μs . Pro přesnější a průkaznější výsledky bychom také s úspěchem využili přesnější voltmetr. Proud se totiž s napětím mění velmi rychle.

Při měření relaxačních kmitů bylo největším problémem zahřívání diaku, které budeme ilustrovat na různých naměřených datech. Závislost periody na kapacitě vyšla velmi dobře lineární, proložená přímkou je všude v mezích chybových úseček. Od $\tau = 0.4 \text{ ms}$ ovšem vidíme pozvolné odchylování od přímky, které připisují právě zahřívání. Vyšší kapacita totiž odpovídá větším napětím a tedy větším proudům.

Zcela jasně můžeme říci, že ze tří použitých metod pro určení frekvence je nejpřesnější čítač a zhruba o řád horší jsou osciloskop a srovnání s tónovým generátorem, které jsou podobně přesné. Všechny tři metody se nicméně v rámci svých chyb shodují. Na Lissajousových obrazcích jsme opět mohli velmi dobře pozorovat zahřívání diaku. Po vyrovnání frekvencí jsme dostali statický obrazec, který se ovšem vždy začal pohybovat a s postupem času stále rychleji.

I měření závislosti frekvence na napětí zdroje ukazuje zahřívání diaku při vyšších napětích. Spínací napětí je na teplotě závislé a naměřená data ukazují, že s teplotou klesá, což koresponduje s tím, že odpor polovodičů s teplotou klesá. V grafu vidíme, že pro nižší hodnoty napětí je teoretický vztah velmi dobrý, ale pro vyšší se rozchází, protože křivka nepočítá s měnícím se spínacím napětím. To nějak závisí na teplotě, která naopak složitě závisí na napětí zdroje, takže není šance, že bychom tuto závislost mohli započítat. Pokud ovšem do (1) dosadíme pro nejvyšší napětí správnou hodnotu $U_{\text{BO}} = 31 \text{ V}$, dostaneme opět shodu experimentu a teorie.

Závěr

Naměřili jsme voltampérovou charakteristiku diaku na Obrázku 7. Určili jsme spínací napětí

$$U_{\text{BO1}} = (32.8 \pm 0.2) \text{ V}, \quad U_{\text{BO2}} = (32.3 \pm 0.2) \text{ V},$$

poklesy napětí při 10 mA

$$\Delta U_1(10 \text{ mA}) = (10.8 \pm 0.2) \text{ V}, \quad \Delta U_2(10 \text{ mA}) = (10.3 \pm 0.2) \text{ V}$$

a symetrii

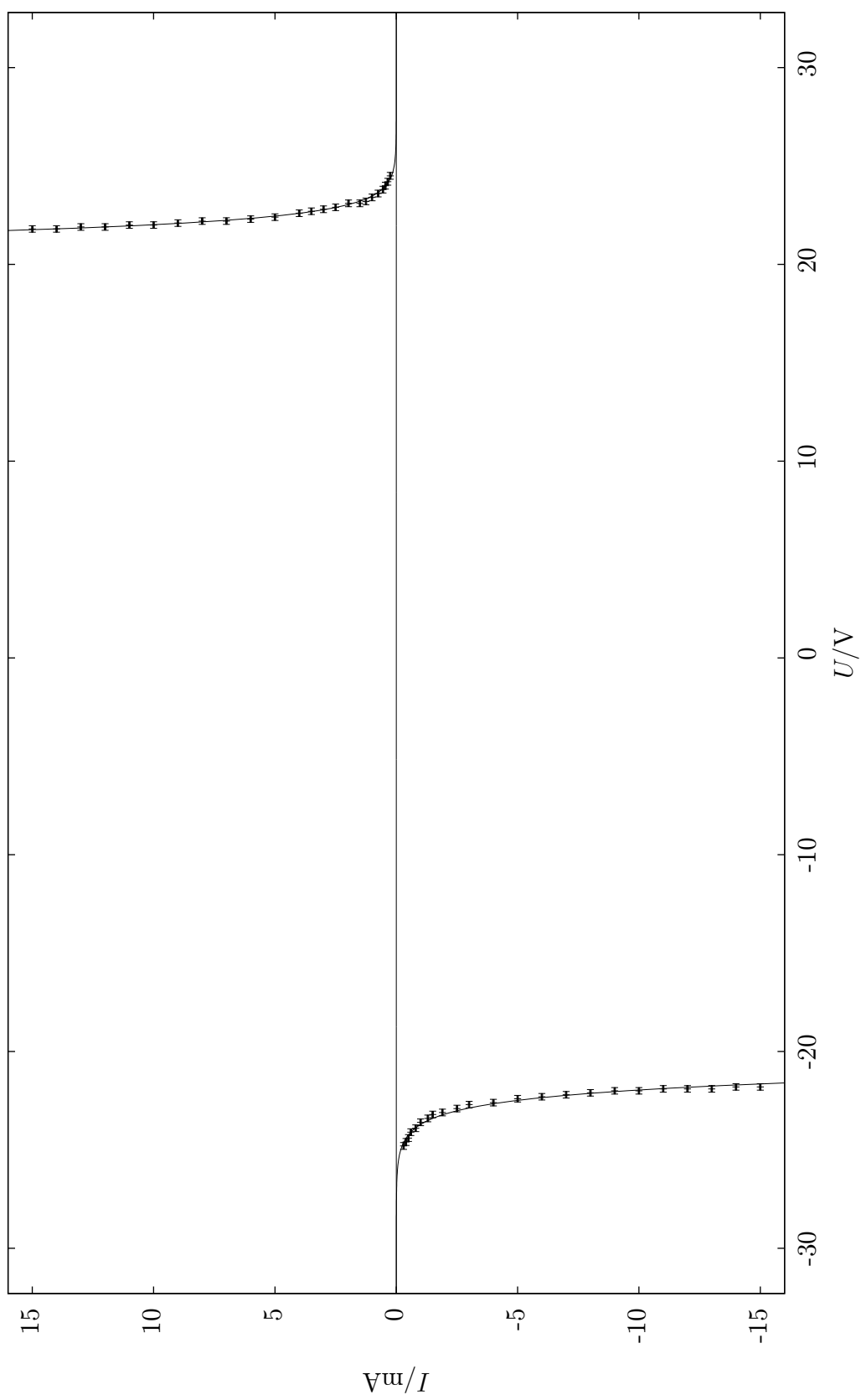
$$|U_{\text{BO1}} - U_{\text{BO2}}| = (0.5 \pm 0.2) \text{ V}.$$

Změřili jsme závislost periody relaxačních kmitů na časové konstantě, výsledek je na Obrázku 5. Porovnali jsme tři metody určování frekvence kmitů – frekvenční čítač, osciloskop a srovnání s tónovým generátorem přes Lissajousovy obrazce.

Změřili jsme závislost frekvence relaxačních kmitů na napětí zdroje, výsledek je na Obrázku 6.

Reference

- [1] Bakule, R. – Šternberk, J. *Fyzikální praktikum II. Elektřina a magnetismus*. Státní pedagogické nakladatelství. Praha.
- [2] *Katalog TESLA*. 1987.



Obrázek 7: Naměřená charakteristika diaku