

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

ZÁKLADNÍ FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM II.
PRO OBOR OBECNÁ FYZIKA

XV. Charakteristiky triódy

Autor:
Samuel Kočišćák

1. novembra 2016

1 Pracovné úlohy

1. Zmerajte anódové charakteristiky triódy *EC(C)83*. Mriežkové napätie U_g mente od 0V do $-2V$ po krokoch 0,5V. Pri meraní neprekračujte maximálnu anódovú stratu $P_a = 0,2W$. Anódové napätie zvyšujte maximálne do 120V.
2. Zmerajte závislosť zosilnenia $A = U_{vyst}/U_{vst}$ (pomer výstupného napätia k vstupnému) triódového zosilovača na frekvencii pre $U_g = -0,5V$, $U_a = 120V$, $R_a = 10^5\Omega$ a $R_a = 5 \times 10^3\Omega$, $U_{vst} = 0,2V$ vo frekvenčnom rozsahu 30Hz až 100kHz.
3. Zmerajte závislosť zosilnenia A na veľkosti anódového odporu pre $U_a = 120V$ v rozsahu $R_a = 5 \times 10^3\Omega$ až $10^5\Omega$, $U_g = -1V$ pri $f = 1kHz$ a $U_{vst} = 0,2V$.
4. Anódové charakteristiky spracujte graficky. V grafe vyznačte oblasť, kde bola prekročená strata $P_a = 0,2W$. Zakreslite taktiež zaťažovacie priamky pre obe hodnoty anódového odporu R_a z úlohy 2. Určte zodpovedajúce pracovné body a stanovte príslušné hodnoty zosilnenia a priebeh frekvenčných charakteristik.

2 Teoretická časť

2.1 Charakteristiky triódy

Trióda je elektrónka s tromi elektródami: anódou, mriežkou a katódou. Prúde tečúci medzi katódou a anódou možno regulovať nielen zmenou anódového napätia U_a , ale najmä zmenou napätia mriežky voči katóde, ktoré býva väčšinou záporné. Vlastnosti triódy charakterizujú veličiny *vnútorný odpor* R_i , *strmosť* S , *zosilňovací činiteľ* μ a *prienik* D . Zavádzame ich vzťahmi (podľa [St]):

$$R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{U_g}, \quad (1)$$

$$S = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right)_{U_a}, \quad (2)$$

$$\mu = - \left(\frac{\partial U_a}{\partial U_g} \right)_{I_a}, \quad (3)$$

$$D = \mu^{-1}, \quad (4)$$

pričom z definícií týchto veličín vyplýva platnosť *Barkhausenovho vzťahu*:

$$R_i S D = 1 \quad (5)$$

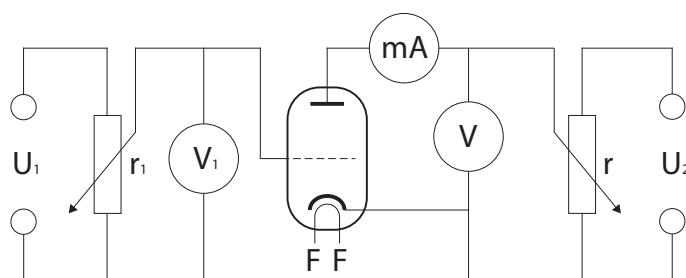
Kompletná charakteristika triódy je teda závislosť $I_a = f(U_a, U_g)$ a jednotlivé veličiny R_i ; S ; μ pri fixovaných hodnotách $U_g; U_a; I_a$ sú iba zúženia tejto dvojrozmernej voltampérovej charakteristiky na jednorozmerný prípad.

Podobne ako v prípade vákuovej diódy (ktorá sa správa takmer ako trióda s mriežkou na potenciále katódy) možno závislosť anódového prúdu I_a na anódovom napätí U_a a mriežkovom napätí U_g popísať (podľa [St]) ako:

$$I_a = k \left(U_g - \frac{U_a}{\mu} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

kde k je konštanta určená konfiguráciou elektród v trióde.

Ak chceme meraním určiť vyššie vymenované charakteristiky triódy, zapojíme^[St] triódu napríklad ako na obrázku 1.



Obr. 1: Meranie charakteristiky triódy

V reálnom zapojení dochádza na prúdom pretekanej trióde k istému úbytku napätia medzi katódou a anódou, kvôli čomu zavádzame veličinu *anódová strata* značenú P :

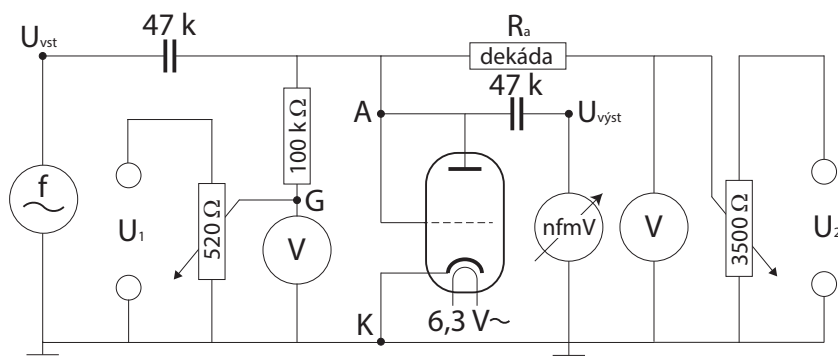
$$P = U_a I_a \quad (7)$$

2.2 Meranie zosilnenia

Zosilňovačom nazývame komponent, ktorý signál nejakej amplitúdy U_{vst} na vstupe zmení na signál inej amplitúdy U_{vyst} na výstpe, typicky $U_{vyst} > U_{vst}$. Zosilnenie A je veličina definovaná vzťahom^[St]:

$$A = \frac{U_{vyst}}{U_{vst}} \quad (8)$$

a pri zosilovaní harmonického signálu je všeobecne okrem iného funkciou frekvencie tohto signálu f ako aj anódového odporu R_a (v schéme na obrázku 2 označeného ako dekáda). Na určenie zosilnenia A v závislosti na f a R_a možno použiť zapojenie ako na obrázku 2, v ktorom na zdroji signálu nastavíme frekvenciu f a efektívnu hodnotu napätia U_{vst} a nízkofrekvenčným voltmetrom (na obrázku 2 označenom ako *nfmV*) meriame efektívnu hodnotu U_{vyst} .



Obr. 2: Meranie zosilnenia

Keďže efektívna hodnota napätia U_{ef} je^[W] iba násobkom amplitúdy stredavého napätia U , konkrétne $0,707U$, tak je jedno, či zosilnenie určujeme ako pomer amplitúd alebo pomer efektívnych hodnôt.

Zosilnenie možno v každom bode $(U_a; I_a)$ voltampérovej charakteristiky triódy taktiež určiť zo znalosti $\mu(U_a; I_a)$, $R_i(U_a; I_a)$ a R_a ako^[St]:

$$A = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i} \quad (9)$$

2.3 Zaťažovacia priamka a pracovný bod

Zaťažovacia priamka^[Zp] zodpovedajúca sériovému zapojeniu nelineárneho prvku (napríklad triódy), odporu R_a a zdroja napätia U je vo voltampérovej charakteristike tohto nelineárneho prvku (závislosti prúdu I_a týmto prvkom na napätí U_a na ňom) priamka prechádzajúca bodmi $I_a = 0; U_a = U$ a $U_a = 0; I_a = \frac{U}{R}$. Zaťažovacia podmienka udáva^[Zp] reláciu medzi prúdom v obvode a napätím na nelineárnom prvku. Priestorom stavov nelineárneho prvku je ale práve jeho voltampérová charakteristika, teda jediný prístupný bod (pracovný bod systému) bude priesečník voltampérovej charakteristiky triódy a zaťažovacej priamky.

3 Výsledky merania

Teplota pri meraní v laboratóriu bola $22,9^\circ\text{C}$ a tlak bol $988,3\text{hPa}$. Podmienky pri meraní v laboratóriu neboli nemenné, keďže meranie trvalo vyše 2 hodín a za ten čas sme v miestnosti niekoľkokrát vetrali, no malá zmena teploty ani tlaku meranie neovplyvnila. Pri všetkých meraniach sme použili jeden kanál dvojkanálovej triódy $EC(C)83$. Pri všetkých meraniach sme triódu žeravili prúdom zodpovedajúcim napätiu $6,3\text{V}$ na žeraviacom vlákne.

3.1 Meranie charakteristík triódy

Pri meraní charakteristík triódy sme vždy nastavili istú hodnotu U_g a U_a pomocou zdroja (regulovateľného stabilizovaného s rozsahom do 2V resp. s pevnou hodnotou napätia 140V), potenciometra a voltmetra (ako v zapojení na obrázku 1).

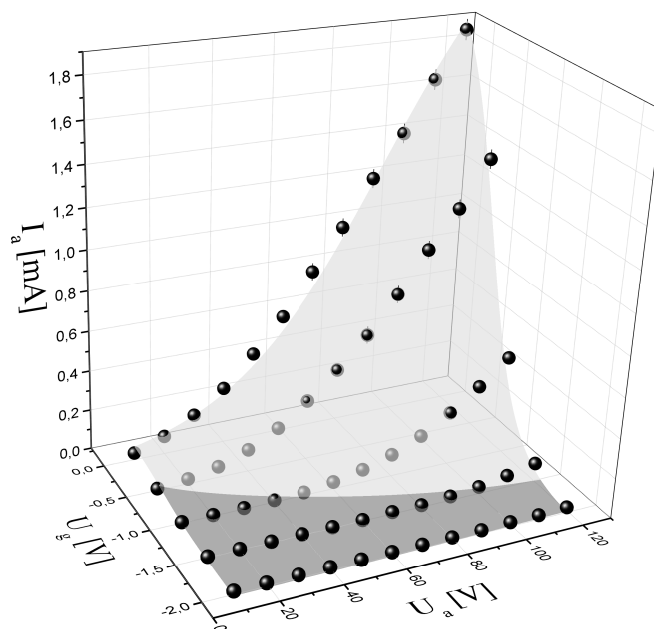
Na určenie hodnoty U_g sme použili analógový voltmeter s triedou presnosti 0,5 a neistotou 2 dieliky so 150 dielikovou stupnicou a používanými rozsahmi 1,5V a 3V.

Na určenie hodnoty U_a sme použili digitálny voltmeter *Metex M3270D*, ktorý má^[Mx] na rozsahu do 200V presnosť 0,8% s chybou 2 v cifre 0,1V.

Hodnotu I_a sme určili pomocou analógového miliampérmetra triedy presnosti 0,5 s chybou určenia dielik 2, so 120 dielikmi a používanými rozsahmi 0,6mA a 2,4mA.

Pri premeriavaní charakteristiky sme vždy najprv zafixovali hodnotu U_g medzi 0V (vodivo spojená mriežka s katódou) a $-2V$ (nižší potenciál na mriežke) s krokom 0,5V. Následne sme menili hodnotu U_a medzi 10V a 120V s krokom 10V a odčítali hodnotu I_a .

Všetky namerané hodnoty sú v priložených dátach a v grafoch na obrázkoch 3 a 4. Chybu určenia U_g , U_a a I_a sme popísali vyššie a v grafe na obrázku 3 je znázornená chybovými úsečkami.



Obr. 3: Graf nameranej závislosti $I_a = f(U_a, U_g)$

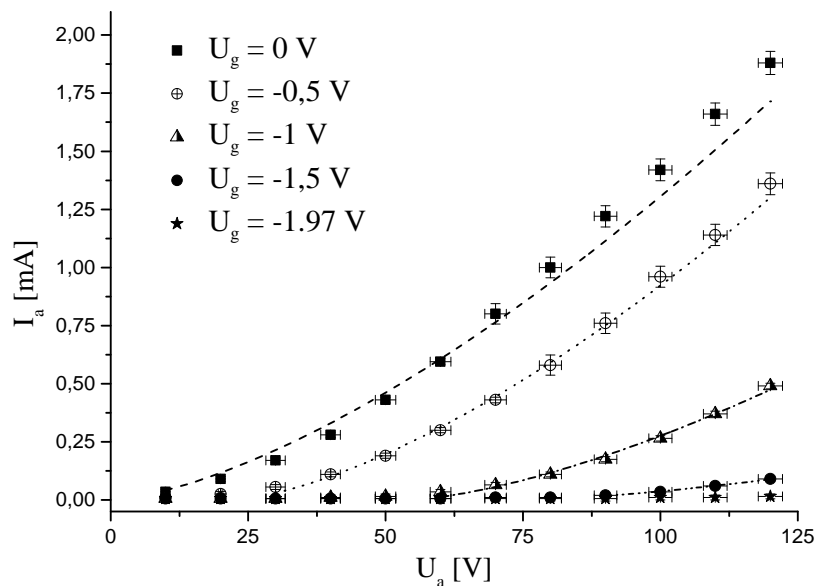
Fit dát v grafe na obrázku 3 je čisto fenomenologický – nefyzikálny. Každopádne, má predpis:

$$I_a = A + \frac{B}{\left(1 + \exp\left(\frac{C-U_g}{D}\right)\right) \left(1 + \exp\left(\frac{E-U_a}{F}\right)\right)} \quad (10)$$

a hodnoty parametrov sú: $A = -0,02 \text{ mA}$, $B = 2,9 \text{ V}$, $C = -0,61 \text{ V}$, $D = 0,27 \text{ V}^{-1}$, $E = 93 \text{ V}$ a $F = 25 \text{ V}^{-1}$.

Ako vidno v grafe na obrázku 4, hodnotu U_g sme boli schopní znížiť iba na $-1,97 \text{ V}$, z dôvodu tesne nedostatočného rozsahu zdroja. Meraniu to však nijak neuškodilo, nie je podstatné namerať krivku závislosti $I_a = f(U_a)$ práve na hodnote $U_g = -2 \text{ V}$.

V grafe na obrázku 4 sú znázornené aj fity jednotlivých závislostí $I_a = f(U_a)$. Dáta boli prekladané krivkou podľa zo vzťahu 6 s voľnými parametrami μ a k . Koficienty fitov aj s chybami ich určenia vidno v tabuľke 1. Fity nerešpektujú všetky namerané body, k tomu prečo, sa vrátíme v diskusii. To, ktoré body sú vo fite zahrnuté je ilustrované tmavšou farbou podfarbenia plochy fitu v grafe na obrázku 3.

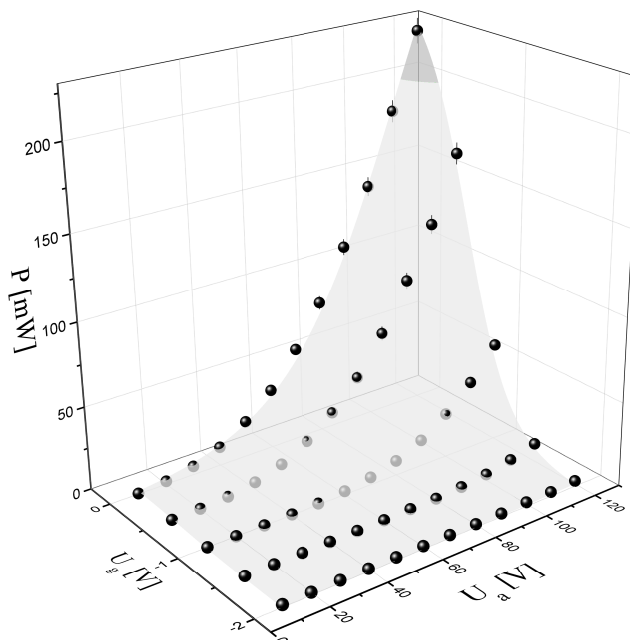


Obr. 4: Grafy nameranej závislosti $I_a = f(U_a)$ pre rôzne U_g

Tabuľka 1: Koefficienty fitu:

napätie U_g [V]	μ [10^{-3}]	σ_μ [10^{-3}]	k [S]	σ_k [S]
0	45	1	–	–
0,5	44	2	0,39	0,05
1	54	2	0,35	0,05
1,5	49	2	0,10	0,01

To, či bola pri meraní prekročená anódová strata 0,22 vidno v grafe závislosti $P = f(U_a, U_g)$ na obrázku 5 – oblasť straty vyššej než 0,2W je zvýraznená. Fit v tomto grafe je tiež nefyzikálny.

Obr. 5: Grafy závislosti $P = f(U_a, U_g)$

Je teda vidno, že anódová strata 0,2W bola prekročená, ale iba pri jednom bode.

3.2 Meranie závislosti zosilnenia na frekvencii

Pri meraní zosilnenia sme zapojili zosilňovač, ktorého hlavným komponentom bola trióda tak, ako na obrázku 2.

Na digitálnom zdroji striedavého signálu sme nastavovali efektívnu hodnotu napätia U_{vst} . Nepresnosť určenia tejto hodnoty zanedbávame, rovnako ako nepresnosť určenia frekvencie f nastavenej na tom istom zdroji.

Efektívnu hodnotu U_{vyst} napätia na výstupe zosilňovača sme merali analógovým nízkofrekvenčným voltmetrom s triedou presnosti 1,5, neistotu 2 v určení dielikú a 50 dielikmi na rozsahu 1V a 10V resp. 30 dielikmi na rozsahu 3V.

Odpor R_a sme nastavovali na šesťmiestnej dekáde s presnosťou 0,1%.

Ako zdroj napätia U_a sme použili zdroj 140V s potenciometrom, hodnotu napätia sme určili vyššie popísaným digitálnym voltmetrom^[Mx] Metex M3270D.

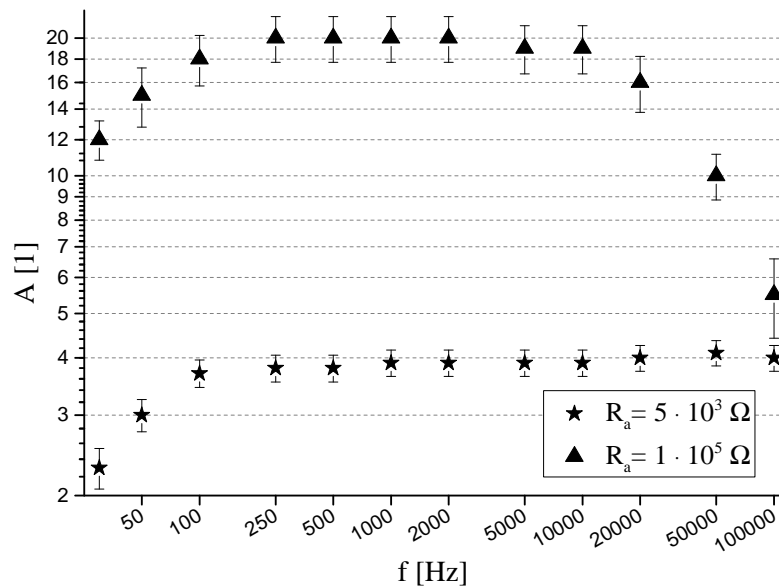
Ako zdroj napätia U_g sme použili regulovaný stabilizovaný zdroj s rozsahom do 2V spomenutý vyššie zapojený na potenciometer a hodnotu napätia U_g sme určili analógovým voltmetrom s rozsahom do 1,2V spomenutým vyššie.

Pri určovaní frekvenčnej závislosti zosilnenia $A = f(f)$ sme nastavili hodnotu $U_a = 119,6V$, $U_g = -0,5V$, $U_{vst} = 0,2V$ a na dekáde sme nastavili najprv hodnotu $R_a = 1 \times 10^5 \Omega$, potom hodnotu $R_a = 5 \times 10^3 \Omega$ a pre každú z týchto dvoch hodnôt sme namerali frekvenčnú závislosť zosilnenia. Výslednú závislosť aj s chybou určenia hodnoty jednotlivých bodov možno vidieť v tabuľke 2 a v grafe na obrázku 6. Chybu určenia A sme z chýb určenia priamo meraných veličín preniesli ako:

$$\sigma_A^2 = \left(\frac{A}{U_{vst}} \right)^2 \sigma_{U_{vst}}^2 + \left(\frac{A}{U_{vyst}} \right)^2 \sigma_{U_{vyst}}^2 \quad (11)$$

Tabuľka 2: Frekvenčná závislosť zosilnenia:

f [Hz]	$R_a = 1 \times 10^5 \Omega$		$R_a = 5 \times 10^3 \Omega$	
	A [1]	σ_A [1]	A [1]	σ_A [1]
30	12	1	2,3	0,2
50	15	2	3	0,2
100	18	2	3,7	0,3
250	20	2	3,8	0,3
500	20	2	3,8	0,3
1×10^3	20	2	3,9	0,3
2×10^3	20	2	3,9	0,3
5×10^3	19	2	3,9	0,3
1×10^4	19	2	3,9	0,3
2×10^4	16	2	4	0,3
5×10^4	10	1	4,1	0,3
1×10^5	5,5	1,1	4	0,3

Obr. 6: Graf nameraných závislostí $A = f(f)$

3.3 Meranie závislosti zosilnenia na anódovom odpore

Pri meraní závislosti $A = f(R_a)$ sme postupovali podobne ako pri meraní $A = f(f)$, ibaže tentoraz sme fixovali hodnotu $f = 1 \text{ kHz}$ a menili sme hodnotu R_a v rozmedzí $5 \times 10^3 \Omega$ až $1 \times 10^5 \Omega$.

Nastavili sme hodnotu $U_g = -1 \text{ V}$ (analogovým voltmetrom, presne ako pri meraní $A = f(f)$) a $U_a = 120 \text{ V}$ (digitálnym voltmetrom).

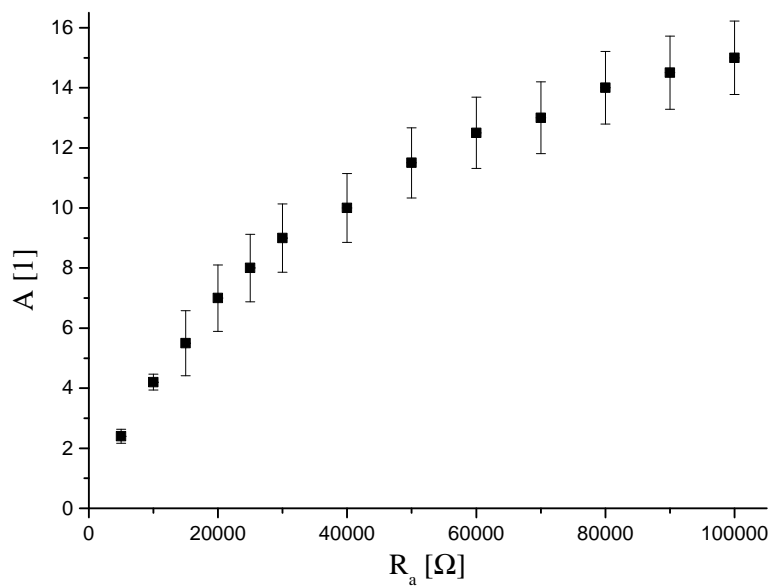
Keďže sme na nastavenie U_a (na rozdiel od U_g) nepoužili stabilizovaný zdroj, ale iba zdroj s fixnou hodnotou napätia 140 V regulovanou potenciometrom, tak hodnota U_a sa počas merania zmenila z dôvodu premennej hodnoty R_a . K tejto zmene napätia U_a sa vrátíme v diskusii.

Namerané dáta aj s chybou prenesenou podľa vzťahu 11 (rovnako, ako pri meraní $A = f(f)$) vidno v tabuľke 3:

Tabuľka 3: Závislosť zosilnenia na anódovom odpore:

$R_a [10^4 \Omega]$	$A [1]$	$\sigma_A [1]$
0,5	2,4	0,2
1	4,2	0,3
1,5	5,5	1
2	7	1
2,5	8	1
3	9	1
4	10	1
5	11,5	1
6	12,5	1
7	13	1
8	14	1
9	14,5	1
10	15	1

Dáta z tabuľky 3 vidno aj v grafe na obrázku 7:



Obr. 7: Graf nameranej závislosti $A = f(R_a)$

3.4 Určenie pracovných bodov

Zaťažovacie priamky dokreslíme do grafu závislosti $I_a = f(U_a)$ tak, ako sme si to vysvetlili v stati 2.3. Pracovné body $[U_p; I_p]$ sú pre jednotlivé zaťažovacie priamky sú ich prieniky so závislosťami $I_a = f(U_a)$ pre jednotlivé odpory U_g . Keďže priamky, samozrejme, neprechádzajú žiadnym nameraným bodom, určíme pracovné body ako prieniky zaťažovacích priamok a fitov týchto voltampérových charakteristík. Voltampérová charakteristika pre $U_g = -1,97V$ nemá fit, no pri tomto napätí v rámci meraného rozsahu U_a netiekol z anódy na katódu žiadny rezonateľný prúd, teda tejto hodnote U_g prislúcha pracovný bod s nulovým prúdom I_p . Všetky dopočítané pracovné body možno vidieť v tabuľke 4.

Tabuľka 4: Pracovné body:

U_g [Hz]	$R_a = 1 \times 10^5 \Omega$		$R_a = 5 \times 10^3 \Omega$	
	U_p [V]	I_p [mA]	U_p [V]	I_p [mA]
0	59	0,60	112	1,57
-0,5	72	0,48	114	1,21
-1	96	0,24	118	0,45
-1,5	113	0,07	120	0,08
-1,97	120	0	120	0

Na určenie zosilnenia v pracovných bodoch pomocou vzťahu 9 musíme poznať hodnoty μ a R_i v týchto bodoch. Hodnotu μ poznáme z fitu (okrem závislosti pre $U_g = -1,97V$) a hodnotu R_i z definície (vzťah 1) určujeme ako prevrátenú hodnotu smernice v bode $[U_a; I_a]$ voltampérovej charakteristiky. Tú určíme taktiež z fitu. Hodnoty R_i , μ aj A pre jednotlivé pracovné body vidno v tabuľke 5:

Tabuľka 5: Zosilnenie v pracovných bodoch:

U_p [V]	I_p [mA]	$\mu [10^{-3}]$	R_i [k Ω]	R_a [k Ω]	A [1]
59	0,60	45	66	100	27
72	0,48	44	69	100	26
96	0,24	54	117	100	25
113	0,07	50	382	100	10
112	1,57	45	48	5	4,2
114	1,21	44	51	5	3,9
118	0,45	54	94	5	2,7
120	0,08	50	351	5	0,7

4 Diskusia výsledkov

Pri meraní úlohy 2, a 3, sme signál generovali digitálnym generátorom signálu, ktorého nepresnosť (nastavenie U_{vst} a f) sme vôbec neuvažovali. Zo vzťahu 11 vidno, že čo do vplyvu na σ_A sú si chyba $\sigma_{U_{vst}}$ určenia U_{vst} a chyba $\sigma_{U_{vyst}}$ určenia U_{vyst} rovnocenné. Hodnotu U_{vyst} poznáme s presnosťou na 1 až 2 platné miesta, na rozdiel od hodnoty U_{vst} , ktorú sme na zdroji zadali na 5 platných miest. Hodnotu frekvencie f možno na zdroji nastaviť taktiež veľmi presne, jej chyba nie je podstatná, keďže sme ju merali na veľmi širokej logaritmickej mierke a presná poloha bodov nie je dôležitá.

V grafe na obrázku 4 nie je priebeh pre $U_g \approx -2$ V fitovaný žiadnou funkciou. Je to preto, že jej body ležia na veľmi nízkych hodnotách I_a , možno povedať, že trióda bola pri takto nízkom potenciáli U_g na mriežke v porovnaní s $U_a = 120$ V prakticky uzavretá, teda tento priebeh nie je zaujímavý pre ďalšie spracovanie.

V tom istom grafe (na obrázku 4) vidno, že fit predpisu podľa vzťahu 6 priebehu $U_g = 0$ V nesedí úplne dobre na dáta. Je to najmä tým, že rozsah je pomerne veľký a vzťah 6 je iba veľmi približná závislosť. Body vyšších hodnôt I_a sa (ako vidno v grafe na obrázku 5) sa blížia k hodnote (a jeden ju aj prekračuje) $P = 0,2$ W, teda naozaj nemožno hovoriť o malých zmenách.

Fity v grafe na obrázku 4 nezohľadňujú všetky body, ale iba body prekračujúce hodnotu $I_a = 0,03$ mA, keďže nižšie nie sú zaujímavé a závislosť sa ani nespráva podľa vzťahu 6. Z tabuľky 1 vidno, že fity pre $U_g = 0,5$ V a $U_g = 1$ V sa zhodli na koeficiente k , ktorý má byť udaný len vnútorným usporiadaním triódy, teda by sa rozhodne nemal meniť. Priebeh pre $U_g \approx -2$ V sme nefitovali (čo sme si vysvetlili vyššie), priebeh pre $U_g = -1,5$ V sa na koeficiente k s ostatnými nezhodol, no pri tomto fite sme (ako sme si vysvetlili vyššie) nezohľadnili všetky body, teda je fit nepresne určený kvôli nízkemu počtu bodov. Problematický je ešte fit priebehu pre $U_g = 0$. V tomto prípade funkcia zo vzťahu 6 degeneruje (kvôli nulovému členu U_g) a parametre k a μ sa stávajú závislými, teda možno určiť iba jeden z nich za znalosti druhého. Keďže hodnotu μ sme potrebovali v stati 3.4, tak sme pri fite fixovali parameter k na hodnotu 0,4 S, keďže ju zhruba takto udávajú fity pre $U_g = 0,5$ V a $U_g = 1$ V.

Pri meraní závislosti $A = f(R_a)$ nebolo napätie U_a konštantné, no menilo sa zhruba o 1 V, čo je zmena v druhej platnej cifre, ktorá je malá v porovnaní s presnosťou nízkofrekvenčného voltmetra s presnosťou na jednu platnú cifru.

V celej 4, úlohe (určení pracovných bodov a ďalšom spracovaní) sme ignorovali závislosť zodpovedajúcu $U_g \approx -2$ V. Mohli sme si to dovoliť, pretože nie je zaujímavá, keďže celá zodpovedá nepriechodnému spoju medzi katódou a anódou.

Pri určovaní pracovných bodov sme nevyčíslili ich chybu ich určenia, napriek tomu, že zjavne bude značná. Prispieva k nej najmä iba približný fit, ktorý samotný je určený so značnou neistotou kvôli neistote určenia jednotlivých bodov. Dopočítané hodnoty zosilnenia v tabuľke 5 pomerne dobre (na aspoň 1 platnú cifru) korešpondujú s hodnotami v grafe na obrázku 6, aj keď popisujú trochu iný stav systému. Napriek tomu, že sa nevieme vyjadriť k presnosti dát v tabuľke 5, nazančujú, že naše meranie je konzistentné, keďže sme dvomi postupmi získali podobné údaje.

5 Záver

Odmerali a znázornili sme charakteristiky triódy $EC(C)83$ v celom požadovanom rozsahu a podarilo sa nám ich úspešne preložiť fyzikálnymi fitmi závislostí.

Určili sme závislosť zosilnenia zosilovača s touto triódou na frekvencii vstupného signálu pre obe požadované hodnoty anódového odporu rovnako ako závislosť zosilnenia na hodnote tohoto odporu pri fixovanej frekvencii signálu.

Graficky sme vyobrazili všetky merané závislosti a určili sme, pri ktorých meraniach bola prekročená odporúčaná maximálna anódová strata.

Do charakteristiky triódy sme zakreslili zaťažovacie priamky a určili sme pracovné body, v ktorých sme dopočítali hodnotu zosilnenia a dosiahli sme zhodu s hodnotu zosilnenia určenou priamo meraním efektívnej hodnoty výstupného signálu.

6 Zoznam použitej literatúry

- [St] Kolektív ZFP KVOF MFF UK. *Študijný text k meraniu: 15. Studium zosilovače s triódou*. [cit. 2016-10-27]. URL: <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_215.pdf>.
- [Zp] Kolektív KFPP MFF. *Skriptá z elektroniky - Zatěžovací přímka* [cit. 2016-10-29]. URL: <<http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/sbirka/TEORIE/dioda2.html>>.
- [W] Kolektív WIKIMEDIA project. *Wikipédia: Striedavý prúd* [cit. 2016-10-29]. URL: <https://sk.wikipedia.org/wiki/Striedav%C3%BD_pr%C3%BAD>.
- [Ds] TESLA. *Datasheet k dvojitej trióde ECC83* [cit. 2016-10-30]. URL: <<https://frank.pocnet.net/sheets/183/e/ECC83.pdf>>.
- [Mx] QTEST. *Metex M 3270D - Technické Údaje* [cit. 2016-10-30]. URL: <<http://www.qtest.cz/mereni-elektricky-ch-velicin/metex-m3270d.htm>>.