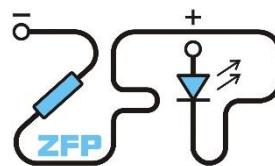


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum II



Úloha č. XV

Název úlohy: Charakteristiky triody

Jméno: Anežka Doležalová

Obor: **FOF** ~~FAF~~ ~~FMUZV~~

Datum měření: 16.10.2018

Datum odevzdání: 23.10.2018

Připomínky opravujícího:

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 3	
Teoretická část	0 - 2	
Výsledky a zpracování měření	0 - 9	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:

dne:

Pracovní úkoly

1. Změřte anodové charakteristiky triody EC(C)83. Mřížkové napětí U_g měňte od 0 do -2 V po krocích 0,5 V. Při měření nepřekračujte maximální anodovou ztrátu $P_a = 0,2$ W. Anodové napětí zvyšujte maximálně do 120 V.
2. Změřte závislost zesílení $A = U_{výst}/U_{vst}$ (poměr výstupního napětí ke vstupnímu) triodového zesilovače na frekvenci pro $U_g = -0,5$ V, $U_a = 120$ V, $R_a = 105 \Omega$ a $R_a = 5.103 \Omega$ $U_{vst} = 0,2$ V ve frekvenčním rozsahu 30 Hz – 100 kHz.
3. Změřte závislost zesílení A na velikosti anodového odporu pro $U_a = 120$ V v rozsahu $R_a = 5.103 - 105 \Omega$. $U_g = -1$ V při $f = 1$ kHz, $U_{vst} = 0,2$ V.
4. Anodové charakteristiky zpracujte graficky. V grafu vyznačte oblast, kde by byla překročena anodová ztráta $P_a = 0,2$ W. Zakreslete rovněž zatěžovací přímky pro obě hodnoty anodového odporu R_a z úkolu 2. Určete odpovídající pracovní body a stanovte příslušné hodnoty zesílení a průběh frekvenčních charakteristik.

Teorie

Trioda je elektronka se třemi elektrodami, stejně jako dioda má anodu a katodu, a navíc obsahuje ještě mřížku uprostřed [1]. Je to nejjednodušší zesilovací elektronka, velikost anodového proudu lze řídit jak anodovým napětím, tak napětím na mřížce. Triodu charakterizují tři vlastnosti – vnitřní odpor, strmost, zesilovací činitel.

Vnitřní odpor triody R_i je definován vztahem

$$R_i = \left(\frac{\delta U_a}{\delta I_a} \right), U_g = konst. \quad (1)$$

kde U_a je anodové napětí, I_a anodový proud a U_g je napětí na mřížce.

Strmost S je zaváděna vztahem

$$S = \left(\frac{\delta I_a}{\delta U_g} \right), U_a = konst. \quad (2)$$

kde je použito stejné značení jako ve vztahu (1).

Zesilovací činitel μ určuje, o kolik musíme změnit anodové napětí, pokud chceme, aby při změně napětí na mřížce o 1 V zůstal anodový proud konstantní. Vyjádřeno vztahem

$$\mu = - \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \right), I_a = konst. \quad (3)$$

kde je opět použito stejné značení jako v (1).

Převrácenou hodnotu zesilovacího činitele lze označit jako průnik D . Poté platí Barkhausenův vztah ve tvaru

$$R_i S D = 1 \quad (4)$$

který vyplývá z definic jednotlivých veličin.

Závislost anodového proudu na napětí lze přibližně vyjádřit třípolovinovým zákonem ve tvaru

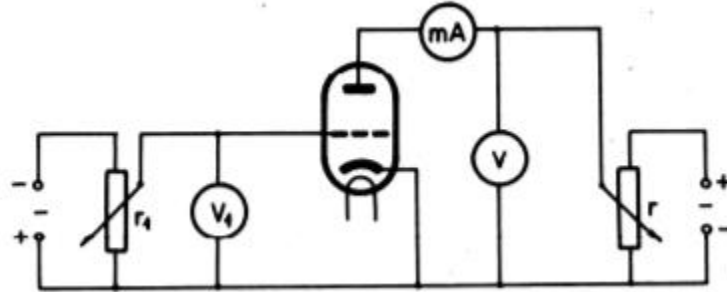
$$I_a = k \left(U_g - \frac{U_a}{\mu} \right)^{3/2} \quad (5)$$

kde k je konstanta určená konfigurací elektrod.

Při konstantním mřížkovém napětí je vztah (5) přibližně anodovou charakteristikou triody.

Měření charakteristiky triody

Trioda zapojená dle schématu na obr. 1 je napájena ze zdroje, na kterém je možno regulovat napětí, které je v obvodu ještě měřeno voltmetrem. Dále měříme anodový proud na ampérmetru. Tímto získáme anodovou charakteristiku triody. Mřížka je připojena na zdroj napětí.



Obr. 1 [2]

Jednostupňový odporový zesilovač

Triodu lze také zapojit do obvodu s odporovým zesilovacím stupněm (viz obr. 2). Vznikne z ní tak zesilovač. Pro výpočet zesílení lze uvažovat následující situaci.

Změnou vstupního napětí U_{vst} se změní anodový proud I_a . Pro tuto změnu platí následující vztah

$$dI_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right)_{U_a = konst.} dU_g + \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{U_g = konst.} dU_a \quad (6)$$

který lze pomocí vztahů (1), (2), (4) přepsat následovně

$$dI_a = \frac{I}{R_i} (\mu \cdot dU_g + dU_a) \quad (7)$$

Z platnosti vztahu

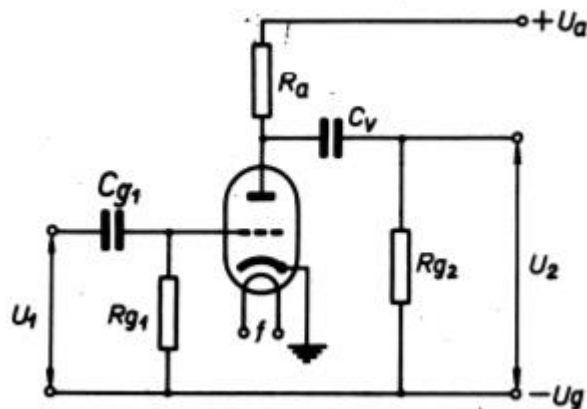
$$dU_a = -R_a dI_a \quad (8)$$

lze zapsat napěťové zesílení triody A , které je definované jako poměr změny napětí na anodě ku změně napětí na mřížce, tímto vztahem

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

kde znaménko mínus značí, že napětí jsou opačné polarity.

Ve vztahu (9) není započítáno několik faktorů, a to především vlastnosti vstupního a výstupního obvodu (C_v a C_{g1} na obr. 2) a parazitních kapacit mezi elektrodami triody. Proto zesílení není přesně dáno vztahem (9), ale platí jen při středních frekvencích. Při nízkých frekvencích zesílení snižuje kondenzátor C_v , kterému se zvyšuje impedance. U vysokých frekvencí omezuje zesílení kapacita mezi anodou a katodou a kapacita voltmetru měřícího napětí. [2]

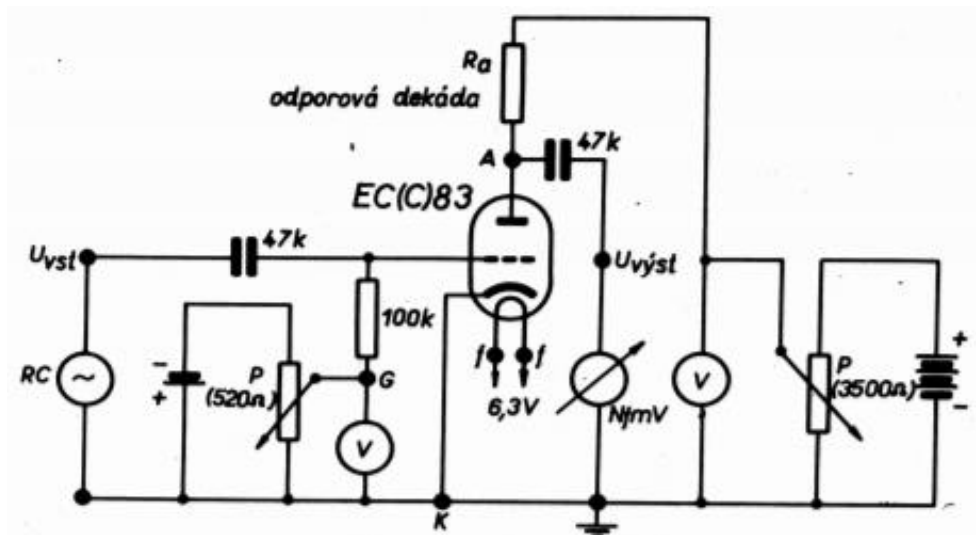


Obr. 2 [2]

Měření zesílení zesilovače

Rozdíl mezi zapojením pro měření anodové charakteristiky triody a pro měření zesílení zesilovače je v tom, že ampérmetr nahradíme odporovou dekádou R_a a svorky U_{vst} a $U_{výst}$ (obr. 3) připojíme k RC generátoru a nízkofrekvenčnímu voltmetru. Pro měření frekvenční charakteristiky měníme nastavení frekvence na RC generátoru v logaritmické stupnici. Necháme přitom nastaveno stálé vstupní napětí a odečítáme výstupní na voltmetru.

Závislost zesílení na anodovém odporu měříme při stálé frekvenci a měníme odpor na odporové dekádě. Opět necháme stálé vstupní napětí a odečítáme výstupní.



Obr. 3 [2]

Výsledky měření

1) Anodová charakteristika triody

Pro triodu s označením EC(C)83 byla změřena závislost anodového proudu na anodovém napětí, tedy anodová charakteristika triody, a to pro pět hodnot mřížkových napětí. U některých mřížkových napětích se objevil proud až u vyšších hodnot napětí, což může znamenat buď nulovou hodnotu proudu při nízkých napětích nebo hodnotu tak malou, že ji nebyl schopný dostupný ampérmetr zaznamenat (použit byl multimetr MATEX M-3270D, jehož nejmenší dílek je $0,02\mu\text{A}$ a jeho udávaná přesnost je $\pm 0,8\% \pm 2$ digit). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 1 spolu s anodovou ztrátou, která jak můžeme vidět nikde nepřesáhla $0,2\text{ W}$. Anodová ztráta byla vypočtena jako součin anodového proudu a anodového napětí.

Pro měření obou napětí byl použit, mimo integrovaného indikátoru ve zdroji, multimetr MASTECH MY-65 jehož přesnost je udávána $\pm 0,1\% \pm 3$ digit.

Tabulka č. 1: Anodová charakteristika triody

$U_g = 0 \text{ V}$			$U_g = - 0,5 \text{ V}$			$U_g = - 1 \text{ V}$			$U_g = - 1,5 \text{ V}$			$U_g = - 2 \text{ V}$		
U_a [V]	I_a [μA]	P [W]	U_a [V]	I_a [μA]	P [W]	U_a [V]	I_a [μA]	P [W]	U_a [V]	I_a [μA]	P [W]	U_a [V]	I_a [μA]	P [W]
0,09	4,2	0	0,12	1,2	0	0,14	0	0	0,16	0	0	0,15	0	0
10	27,6	0	10	8,4	0	10	0,2	0	50	0,6	0	75	0,2	0
20	70,6	0,001	20	23,6	0	20	1,2	0	60	1,6	0	80	0,4	0
30	143,4	0,004	30	53,6	0,002	30	3,6	0	70	4	0	90	1	0
40	245,2	0,010	40	104,6	0,004	40	8,8	0	80	8,8	0,001	100	2	0
50	378,2	0,019	50	179,6	0,009	50	19,6	0,001	90	17,8	0,002	105	3,8	0
60	520	0,031	60	282,4	0,017	60	39,6	0,002	95	24,6	0,002	110	5,2	0,001
70	680	0,048	70	380	0,027	70	71,6	0,005	100	33,2	0,003	115	7,6	0,001
80	860	0,069	80	540	0,043	80	121,6	0,010	105	43,6	0,005	120	10,6	0,001
90	1060	0,096	90	700	0,063	90	189,6	0,017	110	56,4	0,006			
100	1240	0,124	100	860	0,086	100	276,4	0,028	115	72	0,008			
110	1460	0,161	110	1040	0,114	110	389,8	0,043	120	92,2	0,011			
120	1660	0,199	120	1240	0,149	120	500	0,060						

2) Frekvenční závislost zesilovače

Stejná trioda jako v minulém případě byla zapojena podle schématu na obr. 3. Mřížkové napětí bylo nastaveno na hodnotu $U_g = -0,5 \text{ V}$, vstupní napětí na hodnotu $U_{vst} = 0,2 \text{ V}$ a anodové napětí na hodnotu $U_a = 120 \text{ V}$. Frekvenční závislost výstupního napětí na frekvenci v rozmezí 30 Hz – 100 kHz byla změřena pro dvě hodnoty odporu R_a , nastaveném na odporové dekádě. Tyto hodnoty jsou zaznamenány v tabulce č. 2. Pro frekvence byla volena přibližně logaritmická škála, ale při měření v oblasti beze změn nebylo třeba více hodnot, a proto jsou zde rozestupy větší.

Hodnoty U_g , U_a byli měřeny stejnými přístroji jako v předešlé úloze, napětí $U_{výst}$ bylo měřeno milivoltmetrem BM512 s třídou přesnosti 1,5.

Tabulka č. 2: Frekvenční závislost

$R_a = 10^5 \Omega$			$R_a = 5 \cdot 10^3 \Omega$		
f [Hz]	$U_{výst}$ [V]	A	f [Hz]	$U_{výst}$ [V]	A
30	6	30	30	0,97	4,85
60	8,5	42,5	60	1,6	8
90	9	45	90	1,5	7,5
120	10	50	120	1,55	7,75
300	10,5	52,5	300	1,65	8,25
1000	11	55	900	1,65	8,25
5000	10	50	30000	1,6	8
10000	9,5	47,5	70000	1,55	7,75
20000	8	40	90000	1,5	7,5
30000	6,5	32,5	100000	1,5	7,5
40000	5,4	27			
50000	4,4	22			
75000	3,1	15,5			
100000	2,4	12			

3) Závislost zesílení na anodovém odporu

Při stálé frekvenci $f = 1 \text{ kHz}$ a hodnotách napětí $U_g = -1 \text{ V}$, $U_a = 120 \text{ V}$, $U_{vst} = 0,2 \text{ V}$ byla změřena závislost zesílení A na anodovém odporu R_a nastavovaném na dekádě. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Měření opět probíhalo stejnými přístroji, odporová dekáda udává přesnost $\pm 0,1\%$.

Tabulka č. 3: Závislost zesílení na odporu

R_a [k Ω]	U_{vyst} [V]	A
5	1,2	6
6	1,4	7
7	1,6	8
8	1,8	9
9	2	10
10	2,2	11
20	3,6	18
30	4,8	24
40	5,7	28,5
50	6,4	32
60	7	35
70	7,4	37
80	7,8	39
90	8,2	41
100	8,4	42

4) Grafické zpracování

Anodová charakteristika je graficky zpracovaná v grafu č. 1. V tomto grafu jsou vyneseny i zatěžovací přímky pro hodnoty $R_a = 10^5 \Omega$ a $R_a = 5 \cdot 10^3 \Omega$.

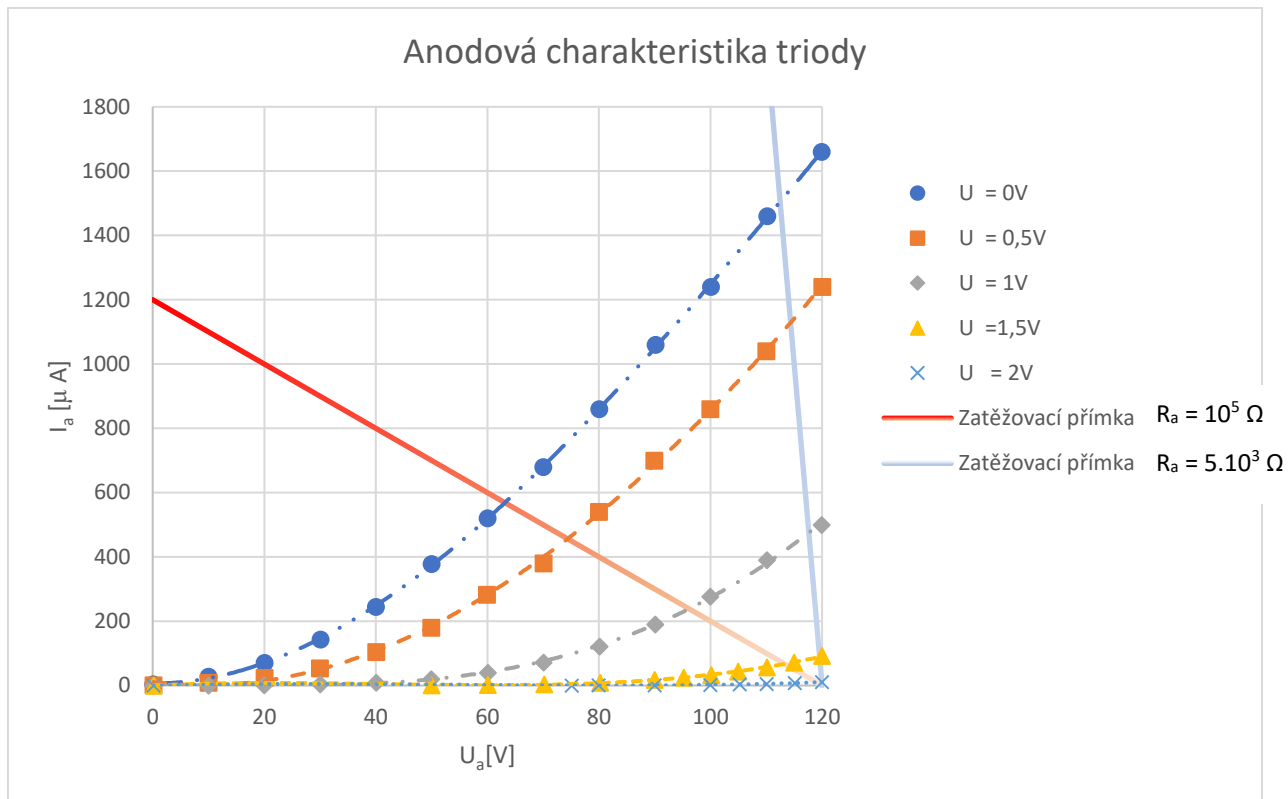
Pomocí těchto přímek byli zjištěny i hodnoty pracovních bodů jako průsečíků těchto přímek s fitem naměřených hodnot. Pracovní body jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Tabulka č. 4: Pracovní body

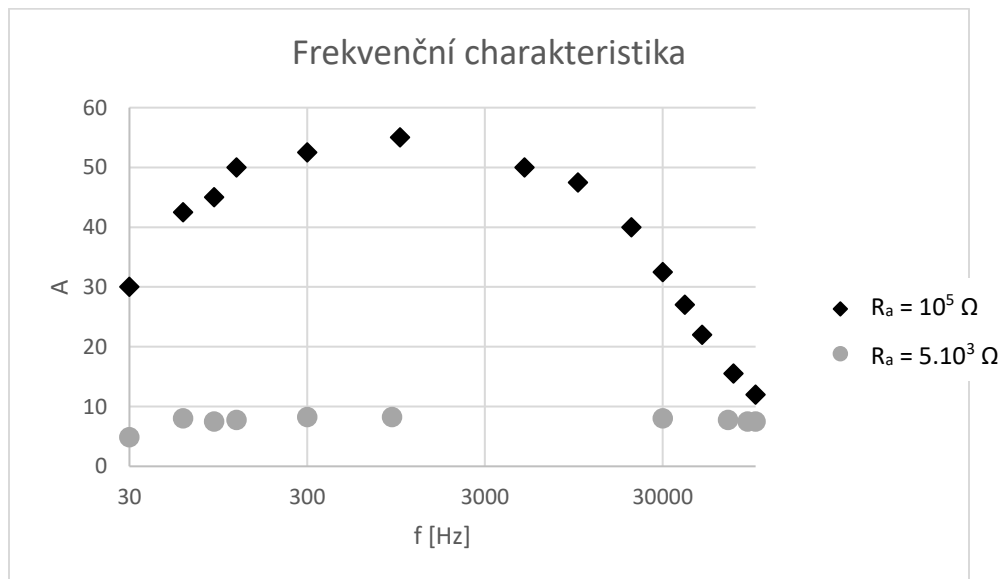
U_g [V]	$R_a = 10^5 \Omega$		$R_a = 5 \cdot 10^3 \Omega$	
	U_a [V]	I_a [μA]	U_a [V]	I_a [μA]
0	63,5	565,1	112,7	1459,1
-0,5	73,9	460,8	114,2	1164
-1	96,3	237	117,6	470,7
-1,5	115	49,7	119,7	63,1
-2	118,5	14,8	120	15,8

V grafu č. 2 je zpracovaná frekvenční charakteristika zesilovače vytvořeného z triody. Tyto hodnoty nelze jednoduše fitovat a proto jsou v grafu zobrazeny pouze jako jednotlivé hodnoty.

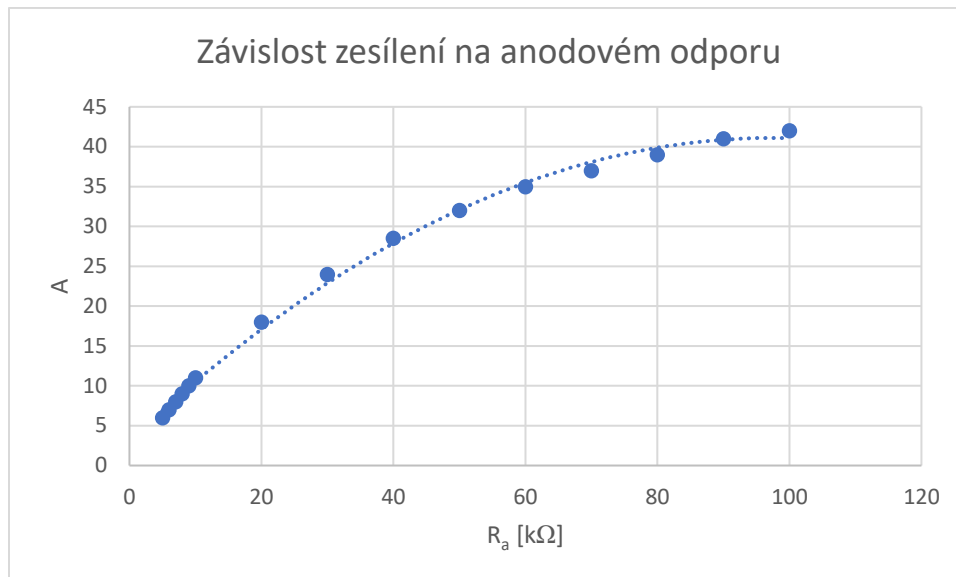
V grafu č. 3 můžeme vidět, že závislost zesílení na anodovém odporu je taková, jakou jsme čekali podle vztahu (9).



Graf č. 1: Anodová charakteristika triody



Graf č. 2: Frekvenční charakteristika



Graf č. 3: Závislost zesílení na anodovém odporu

Diskuse

Anodová charakteristika triody pro mřížková napětí do -1V byla možná změřit na celém povoleném rozsahu, ale pro hodnoty $-1,5\text{V}$ a -2V nešlo změřit minimální proudy protékající anodovým obvodem. Měřicí přístroje nemají dostatečnou citlivost na měření takto minimálních proudů. I tak změřené závislosti odpovídají očekávanému průběhu, čím větší absolutní hodnota mřížkového napětí, tím menší protékající proud – nejlépe je závislost vidět pro $U_g = 0\text{V}$, tedy nejmenší hodnotu mřížkového napětí.

Chyby při všech měřeních jsou způsobené hlavně přesností přístrojů. Další nejistoty mohlo způsobit zapojení, například odpor přívodních vodičů, ale tyto nejistoty jsou minimální vůči přesnosti použitých přístrojů. Další chybu zde způsobil lidský faktor, u digitálních přístrojů je zanedbatelný, ale milivoltmetr, použitý při měření se střídavým proudem, je analogový a odečítání hodnot mohlo také způsobit chyby v měření.

U frekvenční charakteristiky je vidět, že větší odpor způsobuje větší zvětšení, ale na menším úseku. Menší odpor oproti tomu nemá takové zvětšení, ale zato je zvětšení patrné na větším úseku.

Z toho vyplývá, jak by měla vyjít závislost zvětšení na anodovém odporu. Tato závislost vyšla v souladu s předchozími poznatky a to tak, že se zvyšujícím se odporem se zvyšuje zvětšení.

Pracovní body bylo nutné určit z fitu a to již znamená nepřesnost. Další chyby se mohli nahromadit ve výpočtu.

Závěr

Byla změřena anodová charakteristika triody, tedy závislost anodového proudu na napětí, pro pět různých hodnot napětí na mřížce. Tyto závislosti jsou zaznamenány v tabulce č. 1 a grafu č. 1. Nikde nebyla překročena anodová ztráta $P = 0,2 \text{ W}$. Z grafu byly odečteny hodnoty pracovních bodů (tabulka č. 4) po proložení zatěžovacími přímkami.

Dále byla změřena frekvenční závislost, tedy závislost zvětšení na frekvenci pro odpory $R_a = 10^5 \Omega$ a $R_a = 5 \cdot 10^3 \Omega$. Tyto závislosti jsou v tabulce č. 2 a grafu č. 2.

Závislost zvětšení na odporu je zaznamenána v tabulce č. 3 a grafu č. 3.

Zdroje

[1] Trioda – Wikipedie. [online][cit. 22.10.2018]. Dostupné z:

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Trioda>

[2] Základní fyzikální praktikum [Základní fyzikální praktikum]. [online] [cit. 22.10.2018].

Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/media/zadani/texty/txt_215.pdf