

Oddělení fyzikálních praktik při Kabinetu výuky obecné fyziky MFF UK

Praktikum

Úloha č.

Název:

Pracoval: stud.sk.: dne:

Odevzdal dne:

	možný počet bodů	udělený počet bodů
Práce při měření	0 - 5	
Teoretická část	0 - 1	
Výsledky měření	0 - 8	
Diskuse výsledků	0 - 4	
Závěr	0 - 1	
Seznam použité literatury	0 - 1	
Celkem	max. 20	

Posuzoval:.....

dne:

Pracovní úkol

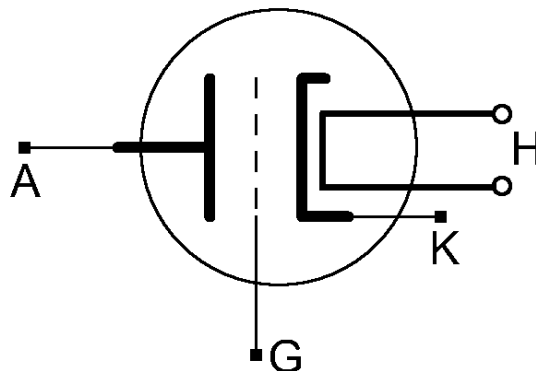
1. Změřte anodové charakteristiky triody EC(C)83. Mřížkové napětí U_g měňte od 0 do -2 V po krocích 0,5 V. Při měření nepřekračujte maximální anodovou ztrátu $P_a = 0,2$ W. Anodové napětí zvyšujte maximálně do 120 V.
2. Změřte závislost zesílení $A = U_{výst}/U_{vst}$ (poměr výstupního napětí ke vstupnímu) triodového zesilovače na frekvenci pro $U_g = -1$ V, $U_a = 120$ V, $R_a = 10^5$ Ohmů a $R_a = 5 \cdot 10^3$ Ohmů, $U_{vst} = 0,3$ V ve frekvenčním rozsahu 30 Hz - 100 kHz.
3. Změřte závislost zesílení A na velikosti anodového odporu pro $U_a = 120$ V v rozsahu $R_a = 5 \cdot 10^3 - 10^5$ Ohmů. $U_g = -1$ V při $f = 1$ kHz, $U_{vst} = 0,3$ 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.

Teoretický základ

*Postup převzat ze [2], metody zpracování z [1].

Trioda

Trioda je nejjednodušším typem zesilovací elektronky. Konstrukčně se jedná nejčastěji o skleněnou vakuovou trubici, uvnitř které jsou dvě hlavní elektrody, anoda (označená písmenem A) a katoda (označená písmenem K), mezi nimiž je umístěna mřížka (označená písmenem G). Schématickou značku triody spolu se žhavicími kontakty označenými písmenem H ukazuje Obr. 1.



Obr. 1 – Schématická značka triody

Proud triodou lze krom napětí mezi anodou a katodou řídit napětím mřížky proti katodě. To z triody dělá tzv. aktivní součástku, kterou můžeme použít jako zesilovač. Jako takovou ji můžeme charakterizovat pomocí vnitřního odporu, strmosti a zesilovacího činitele.

Charakteristiky triody

Vnitřní odpor triody při konstantním mřížkovém napětí můžeme definovat vztahem:

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

Kde δU_a je změna anodového napětí a δI_a je změna anodového proudu.

Pro tuto charakteristiku je vhodné používat jednotku kiloohm, protože pak číslo udávající vnitřní odpor udává i o kolik voltů je třeba změnit anodové napětí, aby se anodový proud změnil právě o 1 mA.

Strmost triody udává, o kolik se změní anodový proud při změně mřížkového napětí za konstantního anodového napětí. Definovat ji pak můžeme jako:

$$\circ S = \left(\frac{\delta I_a}{\delta U_G} \right) \quad (2)$$

Kde δU_G je změna mřížkového napětí.

Pro tuto veličinu je vhodné používat jednotky miliampér na volt. Výsledné číslo pak udává, o kolik změníme anodový proud, změníme-li mřížkové napětí o 1V.

Zesilovací činitel triody udává poměr mezi přírůstkou napětí mřížkového a anodového za konstantního anodového proudu. Definujeme jej jako:

$$\circ a = - \left(\frac{\delta U_a}{\delta U_G} \right) \quad (3)$$

Tato veličina udává, o kolik musíme změnit anodové napětí, abychom po změně mřížkového napětí o 1V dosáhli stejného anodového proudu.

Jednotlivé charakteristiky triody z definice splňují Barkhausenův vztah:

$$\circ \frac{R_i S}{a} = 1 \quad (4)$$

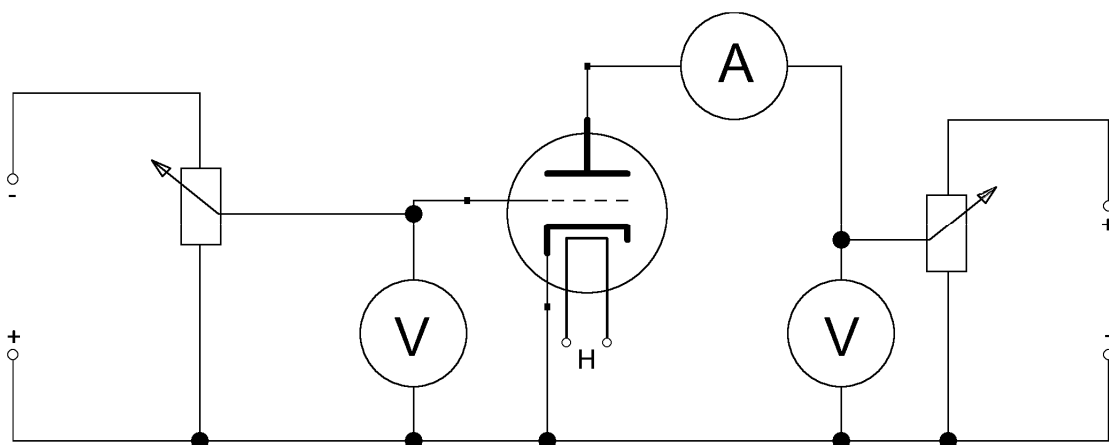
Očekávaný průběh závislosti anodového proudu na anodovém napětí lze psát jako třípolovinový zákon, v němž zvolíme konstantní mřížkové napětí U_G :

$$\circ I_a = k \left(U_G - \frac{U_a}{a} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (5)$$

Kde k je konstanta daná rozmístěním elektrod.

Měření charakteristik triody

Měření výše popsaných charakteristik triody budeme provádět v zapojení, které ukazuje schéma na Obr. 2.

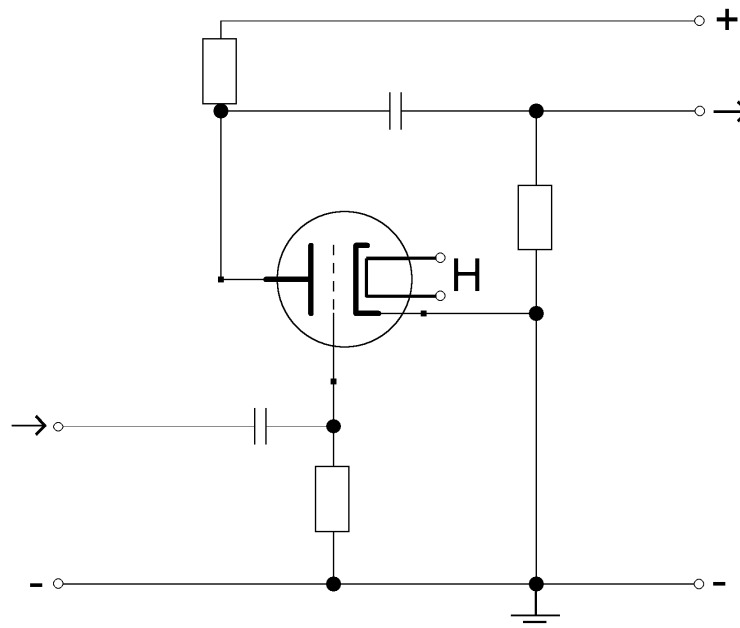


Obr. 2 – Schéma zapojení pro měření charakteristik triody

V tomto zapojení napájíme triodu zdrojem v pravé části schématu, žhavení H zajišťuje samostatný zdroj a mřížkové napětí získáváme také samostatným zdrojem, který je vyobrazen v levé části schématu. Napětí zdrojů regulujeme děliči napětí, které jsou zařazené paralelně k nim.

Jednostupňový zesilovač s triodou

Zapojení jednoduchého zesilovače střídavých proudů s triodou ukazuje schéma na Obr. 3.



Obr. 3 – Schéma zapojení jednostupňového zesilovače s triodou

Na vstup tohoto zesilovače přivádíme signál ze signálového generátoru skrze vazební kondenzátor, a zesílený signál odebíráme opět přes vazební kondenzátor z anody. Pro jednoduchost nebudeme vliv těchto vazebních členů uvažovat, spokojíme se s kvalitativní úvahou, že pro střední frekvence bude jejich vliv na zesílení malý, a směrem k nižším a vyšším frekvencím bude činnost zesilovače zhoršena nejen jejich impedancemi.

Velikost zesílení takového stupně můžeme odvodit z následující úvahy – změním-li mřížkové napětí, změní se anodový proud. Víme tedy, že $I_a = I_a(U_G, U_a)$, protože anodový proud je samozřejmě také závislý na anodovém napětí. Provedme tedy totální diferenciaci této funkce:

$$\circ \quad dI_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_G} \right)_{U_a} dU_G + \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{U_G} dU_a \quad (6)$$

V rovnici vidíme vystupovat strmost a reciprokový vnitřní odpor elektronky. S využitím Barkhausenova vztahu lze psát:

$$\circ \quad dI_a = \frac{I}{R_i} (a dU_G + dU_a) \quad (7)$$

Při uvážení prostého Ohmova zákona pro odpor zařazený v anodě dostáváme:

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

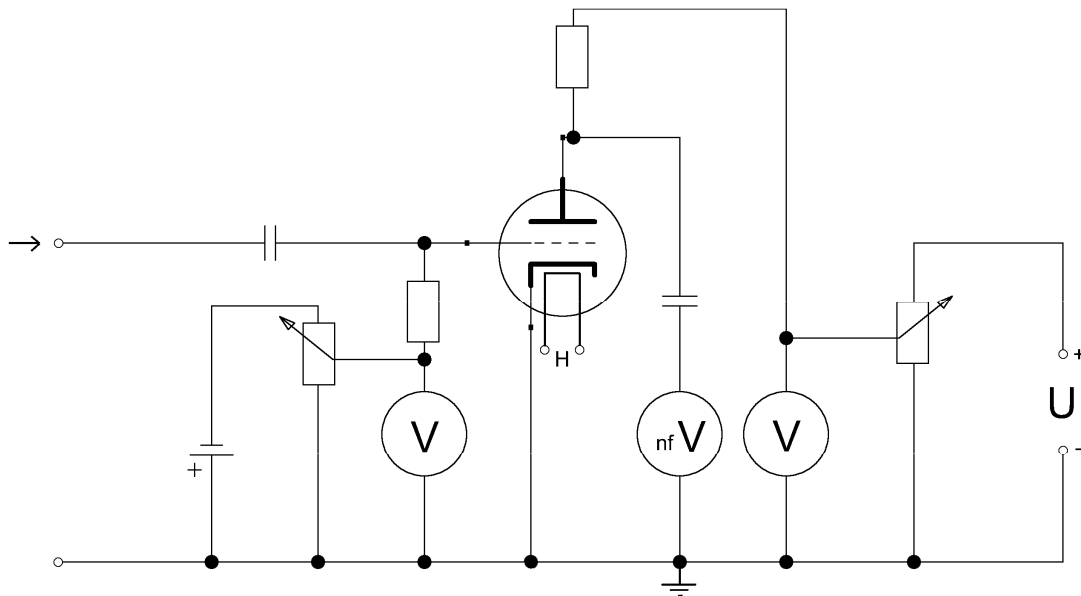
Kde R_a je hodnota odporu rezistoru zařazeného v anodě.

Z těchto úvah potom můžeme dostat vztah pro napěťové zesílení triody:

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

Měření zesílení triodového zesilovače

Schéma zapojení, s nímž budeme pracovat, ukazuje Obr. 4.



Obr. 4 – Schéma zapojení triodového zesilovače pro měření zesílení

Zdrojem vstupního signálu bude signální generátor, který nám umožní sledovat závislost zesílení triodového zesilovače na frekvenci vstupního signálu. Připojíme jej mezi svorku pro vstupní signál a zem.

Při měření závislosti zesílení zesilovače na anodovém odporu bude na jeho místě zapojena odporová dekáda, která nám umožní pohodlně anodový odpor měnit.

*Pozn.: Při měření závislosti zesílení na frekvenci a anodovém odporu je vhodné dávat dobrý pozor na zachování konstantnosti hodnot vstupního napětí.

Pomůcky

stabilizovaný zdroj napětí, signálový generátor, dvojitá trioda EC(C)83, baterie, žhavicí transformátor, odporová dekáda, ampérmetr, voltmetr, nf voltmetr, vodiče

Výsledky měření

*Uváděné chyby jsou mezního charakteru, tedy $P \approx 0,997$.

Úkol 1 – Anodové charakteristiky

Anodové charakteristiky byly měřeny při různých velikostech mřížkových napětí. Naměřené hodnoty ukazují Tab. 1 – Tab. 5.

Graficky hodnoty zachycují grafy G. 1 – G. 5 číslované v souladu s označením tabulek. V závorce následující po názvu grafu a v argumentu funkce v legendě je vždy uvedena velikost mřížkového napětí, při němž byla charakteristika měřena. Rozumíme tím:

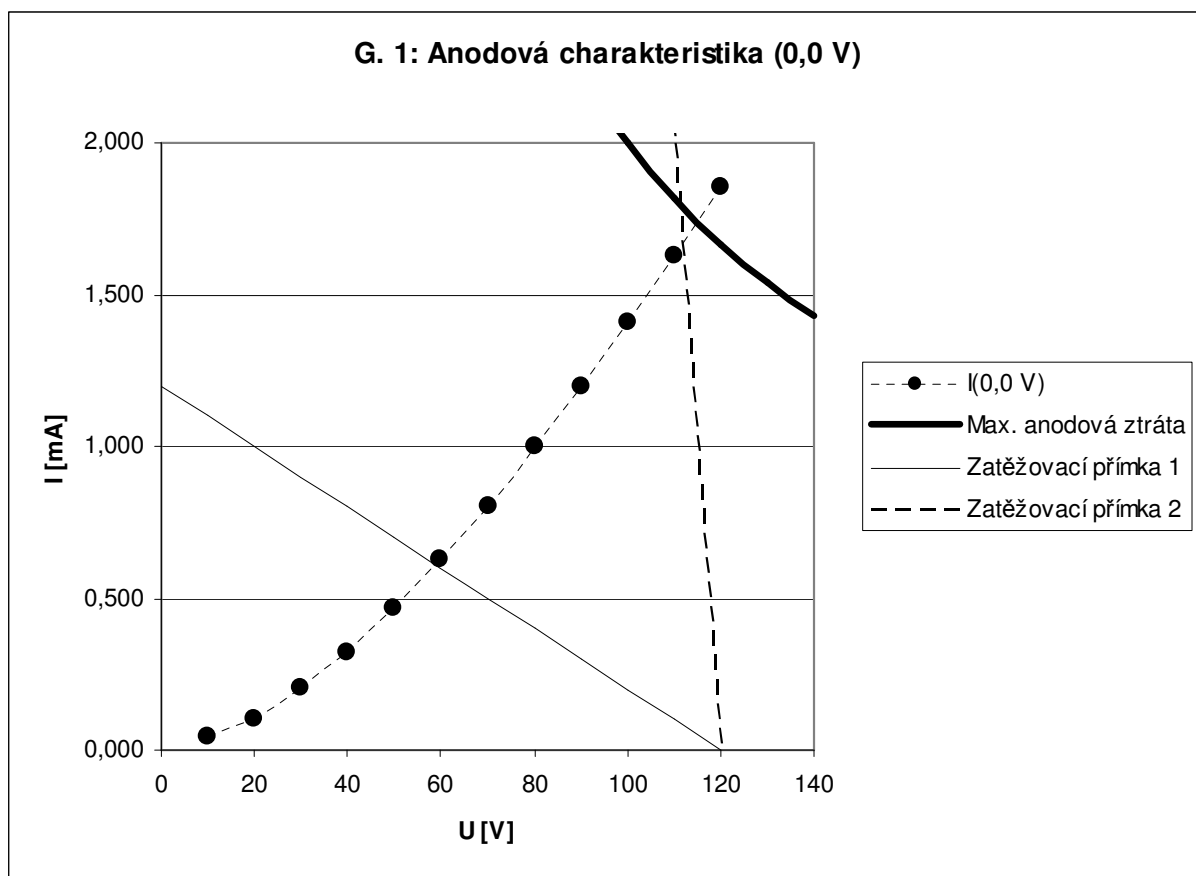
$$\circ I = I(U_G) = I(U_a; |U_G| = konst.)$$

Kde $I(U_G)$ je značení z legendy grafů, $I(U_a; |U_G| = konst.)$ vyjadřuje skutečnou závislost, kterou značením rozumíme, tedy závislost anodového proudu na anodovém napětí při konstantní hodnotě mřížkového napětí.

Do grafů také byly vyznačeny zatěžovací přímky. Jejich značení odpovídá $R_a = 10^5 \Omega$ pro zatěžovací přímky 1 a $R_a = 5 \cdot 10^3 \Omega$ pro zatěžovací přímky 2.

Tab. 1 – Naměřené hodnoty ($U_G = 0,0V$)

$I [mA]$	$U [V]$
0,043	10
0,105	20
0,202	30
0,322	40
0,467	50
0,629	60
0,806	70
0,998	80
1,200	90
1,411	100
1,626	110
1,857	120

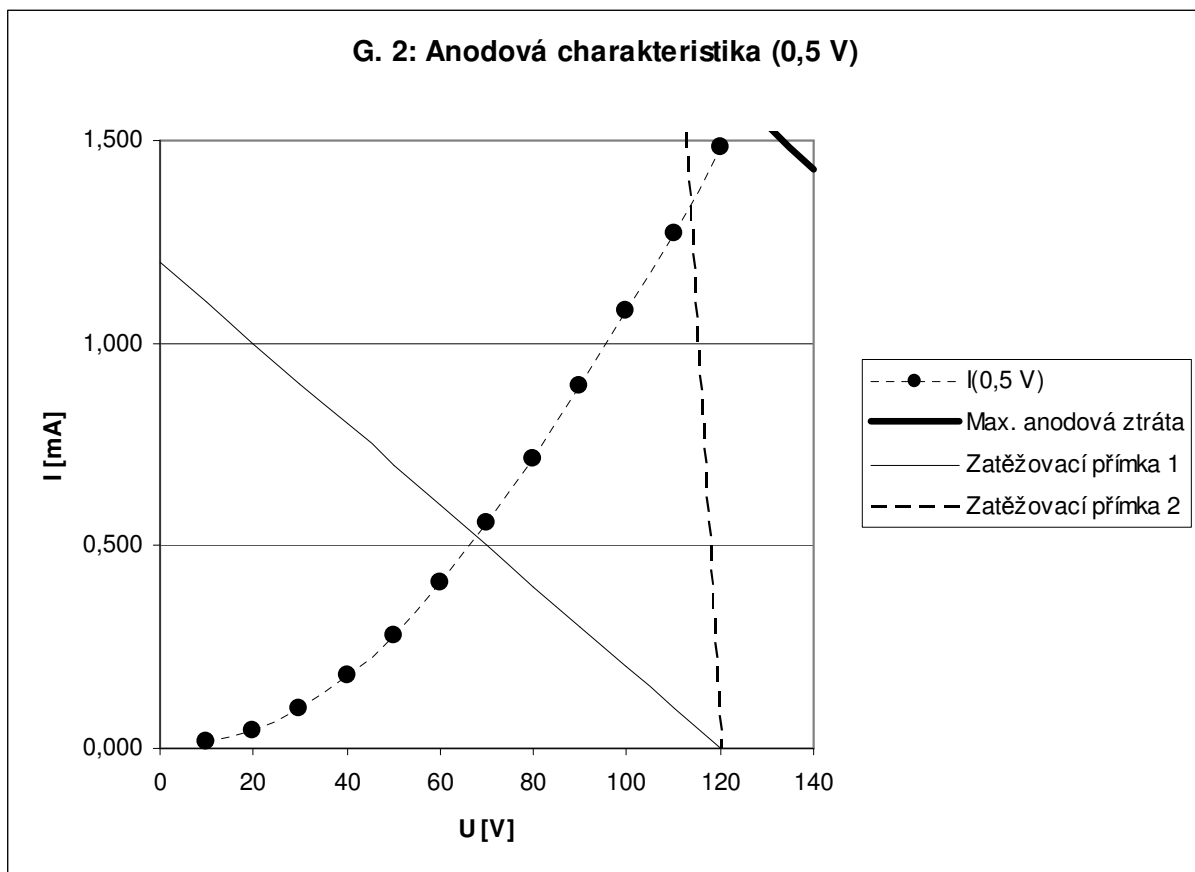


Z naměřené charakteristiky byly určeny pracovní body. Jejich indexy odpovídají hodnotě anodového odporu v $k\Omega$:

- $U_5 = (112 \pm 2)V$
- $I_5 = (1,66 \pm 0,03)mA$
- $U_{100} = (59 \pm 2)V$
- $I_{100} = (0,61 \pm 0,03)mA$

Tab. 2 – Naměřené hodnoty ($U_G = 0,5V$)

$I [mA]$	$U [V]$
0,016	10
0,046	20
0,100	30
0,181	40
0,276	50
0,411	60
0,554	70
0,716	80
0,894	90
1,079	100
1,273	110
1,485	120

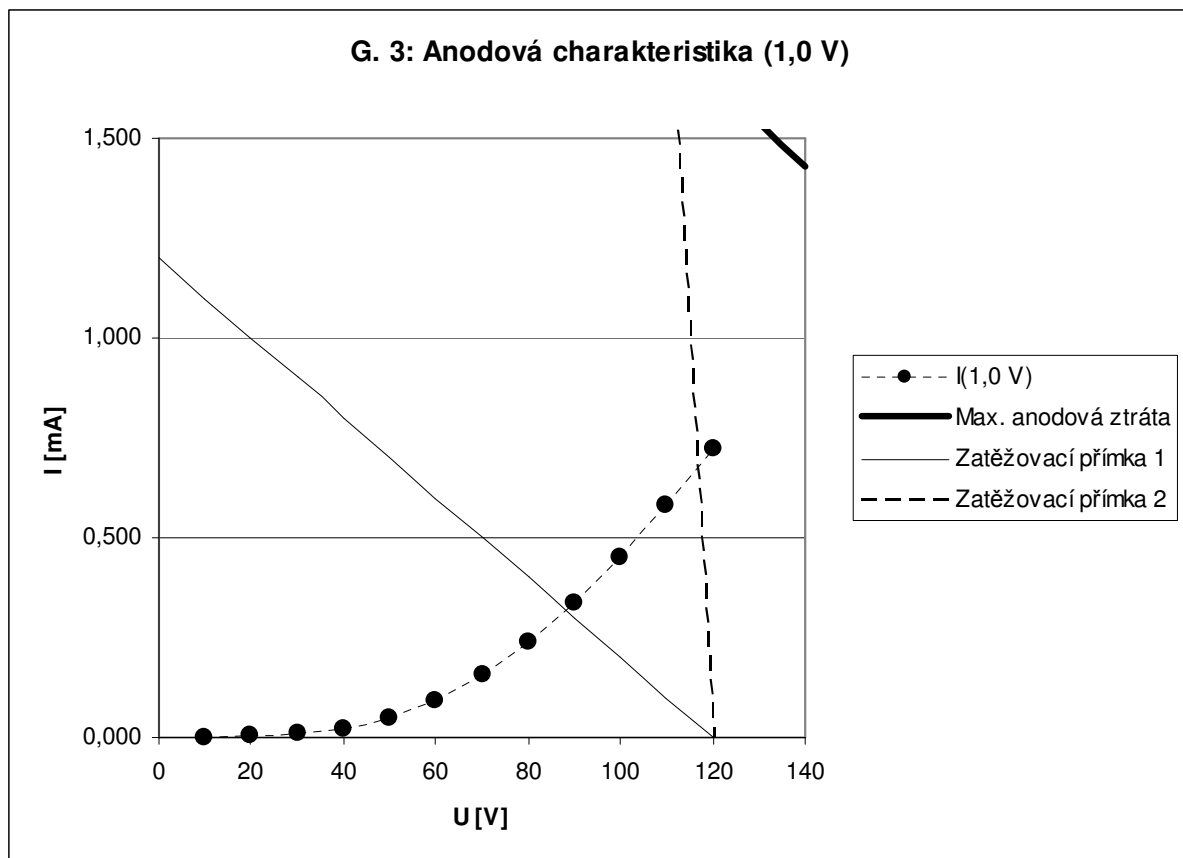


Z naměřené charakteristiky byly určeny pracovní body. Jejich indexy odpovídají hodnotě anodového odporu v $k\Omega$:

- $U_5 = (114 \pm 2)V$
- $I_5 = (1,34 \pm 0,03)mA$
- $U_{100} = (68 \pm 2)V$
- $I_{100} = (0,52 \pm 0,03)mA$

Tab. 3 – Naměřené hodnoty ($U_G = 1,0V$)

I [mA]	U [V]
0,001	10
0,003	20
0,010	30
0,024	40
0,050	50
0,094	60
0,155	70
0,241	80
0,338	90
0,450	100
0,579	110
0,723	120

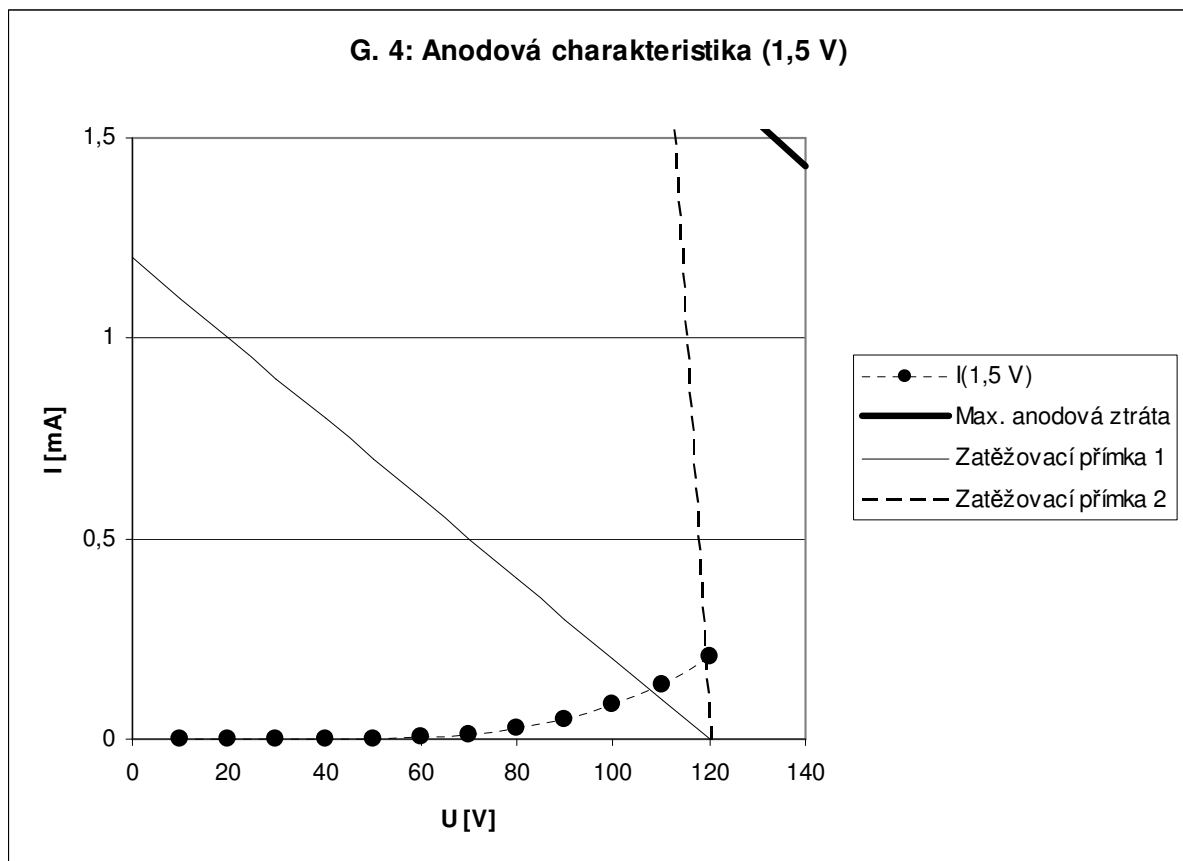


Z naměřené charakteristiky byly určeny pracovní body. Jejich indexy odpovídají hodnotě anodového odporu v $k\Omega$:

- $U_5 = (117 \pm 2)V$
- $I_5 = (0,67 \pm 0,03)mA$
- $U_{100} = (88 \pm 2)V$
- $I_{100} = (0,32 \pm 0,03)mA$

Tab. 4 – Naměřené hodnoty ($U_G = 1,5V$)

$I [mA]$	$U [V]$
0,000	10
0,000	20
0,000	30
0,001	40
0,002	50
0,005	60
0,013	70
0,027	80
0,050	90
0,087	100
0,136	110
0,205	120

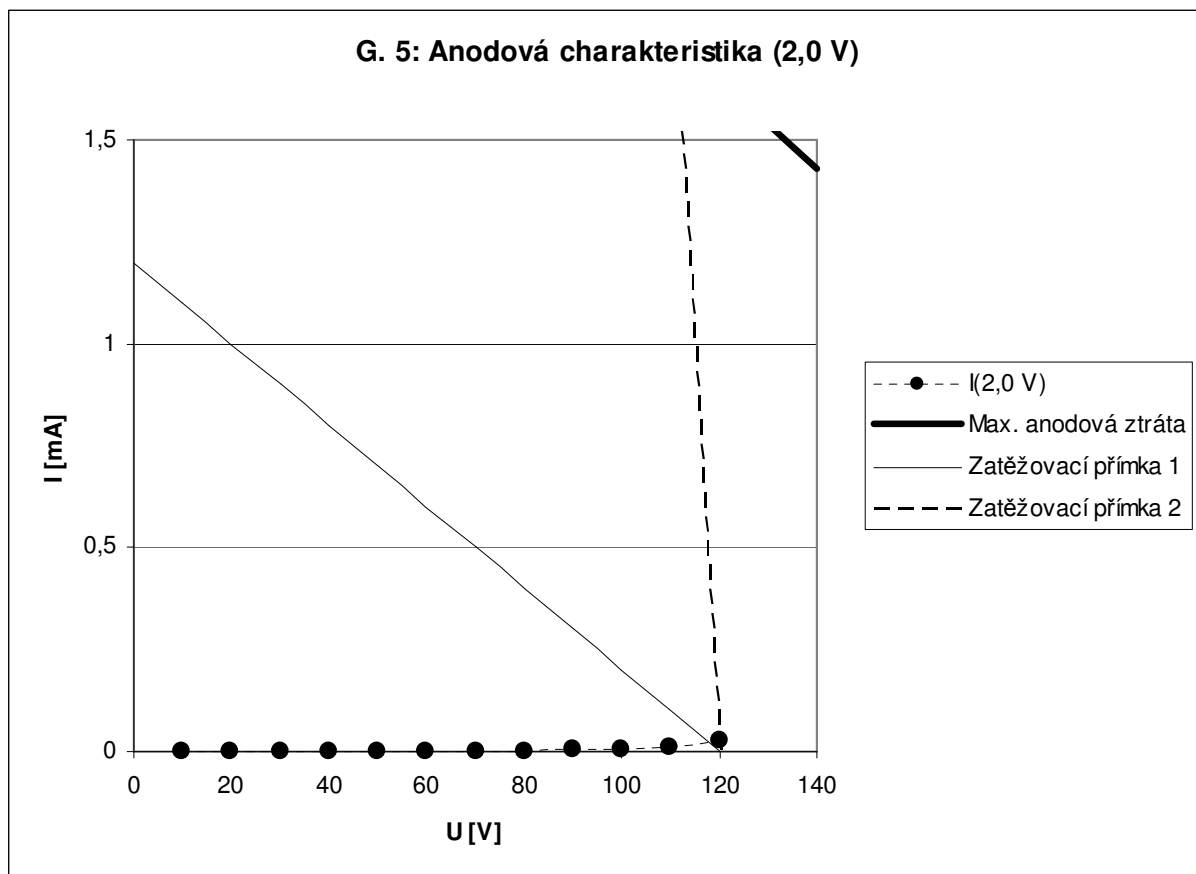


Z naměřené charakteristiky byly určeny pracovní body. Jejich indexy odpovídají hodnotě anodového odporu v $k\Omega$:

- $U_5 = (119 \pm 2)V$
- $I_5 = (0,2 \pm 0,03)mA$
- $U_{100} = (108 \pm 2)V$
- $I_{100} = (0,12 \pm 0,03)mA$

Tab. 5 – Naměřené hodnoty ($U_G = 2,0V$)

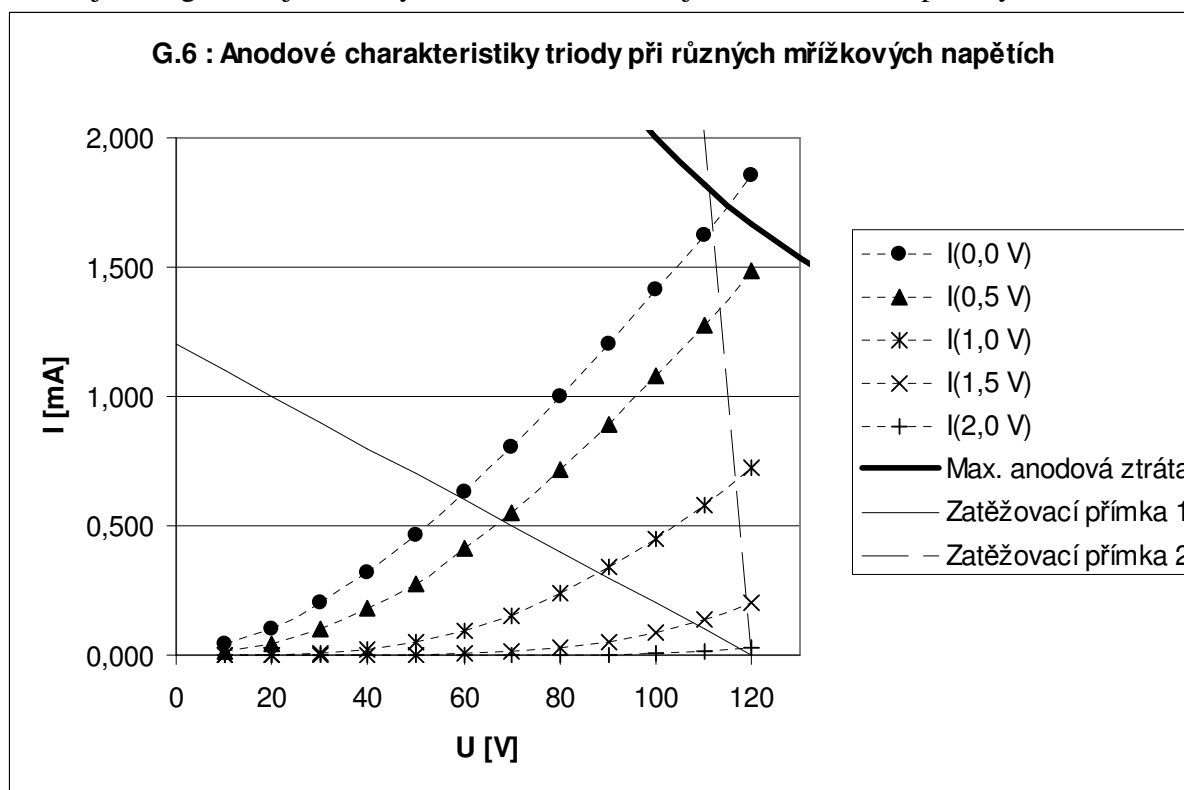
$I [mA]$	$U [V]$
0,000	10
0,000	20
0,000	30
0,000	40
0,000	50
0,000	60
0,001	70
0,001	80
0,003	90
0,007	100
0,013	110
0,026	120



Z naměřené charakteristiky byly určeny pracovní body. Jejich indexy odpovídají hodnotě anodového odporu v $k\Omega$:

- $U_5 = (120 \pm 2)V$
- $I_5 = (0,02 \pm 0,03)mA$
- $U_{100} = (118 \pm 2)V$
- $I_{100} = (0,02 \pm 0,03)mA$

Všechny naměřené anodové charakteristiky byly pro lepší představu vzájemných vztahů vyneseny do grafu G.6 tabulky Tab. 6. Argumenty funkcí v grafu se řídí stejnou notací, jako v grafech jednotlivých charakteristik. Stejně tak zatěžovací přímky.



Tab. 6 – Naměřené hodnoty anodových charakteristik

$U_G = 0,0V$		$U_G = 0,5V$		$U_G = 1,0V$		$U_G = 1,5V$		$U_G = 2,0V$	
I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]
0,043	10	0,016	10	0,001	10	0,000	10	0,000	10
0,105	20	0,046	20	0,003	20	0,000	20	0,000	20
0,202	30	0,100	30	0,010	30	0,000	30	0,000	30
0,322	40	0,181	40	0,024	40	0,001	40	0,000	40
0,467	50	0,276	50	0,050	50	0,002	50	0,000	50
0,629	60	0,411	60	0,094	60	0,005	60	0,000	60
0,806	70	0,554	70	0,155	70	0,013	70	0,001	70
0,998	80	0,716	80	0,241	80	0,027	80	0,001	80
1,200	90	0,894	90	0,338	90	0,050	90	0,003	90
1,411	100	1,079	100	0,450	100	0,087	100	0,007	100
1,626	110	1,273	110	0,579	110	0,136	110	0,013	110
1,857	120	1,485	120	0,723	120	0,205	120	0,026	120

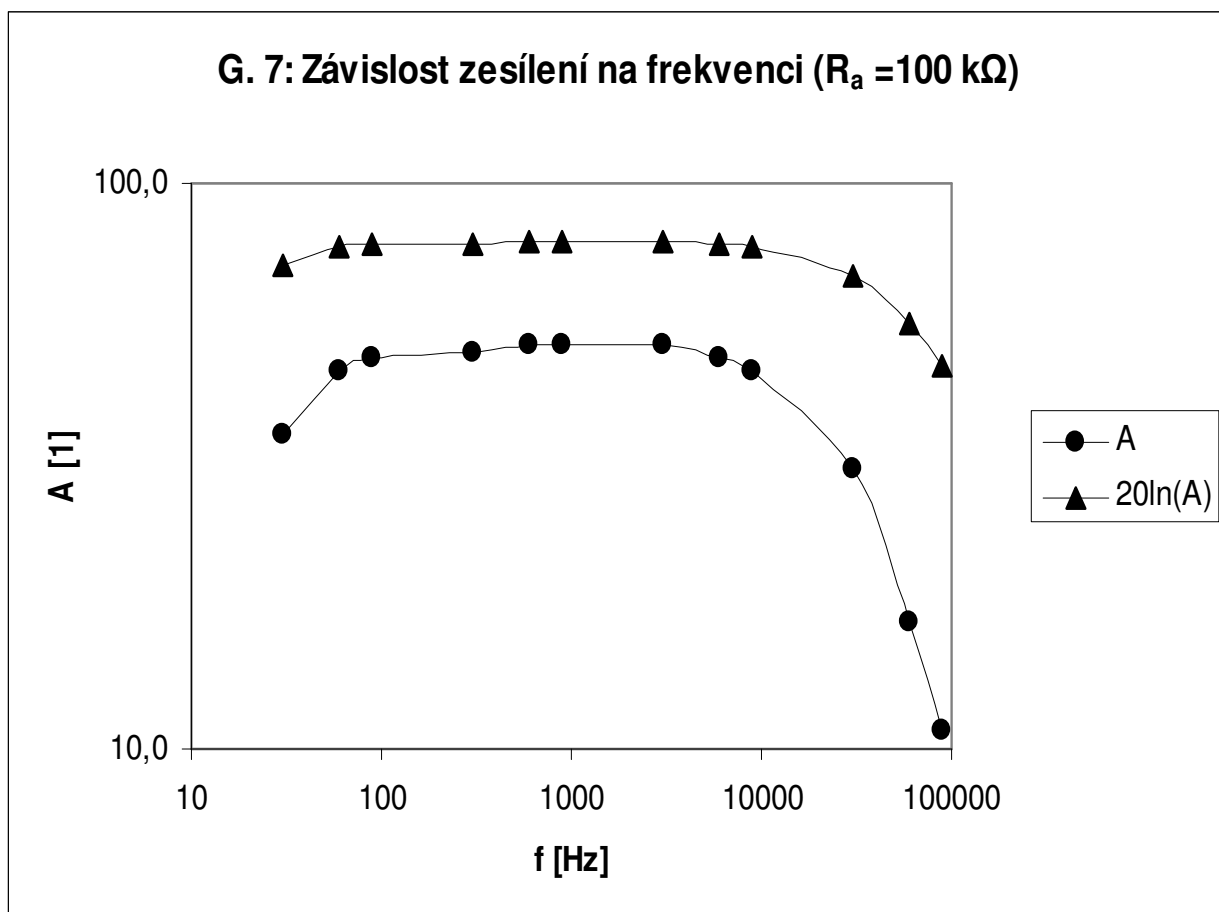
Úkol 2 – frekvenční závislost zesílení

Závislost zesílení jednostupňového odporového zesilovače byla měřena při dvou hodnotách anodového odporu, a to $5k\Omega$ a $100k\Omega$. Vstupní napětí činilo konstantně $0,2V$, anodové napětí pak konstantně $120V$, mřížkové napětí činilo konstantně $-1V$. Naměřené hodnoty ukazují Tab. 7 a Tab. 8. Graficky je zachycují G. 7 a G. 8 v odpovídajícím číslování.

Do grafů, které mají logaritmické škály, byly krom absolutních hodnot zesílení zaneseny i řady $20 \cdot \ln(A)$, kde A je velikost zesílení.

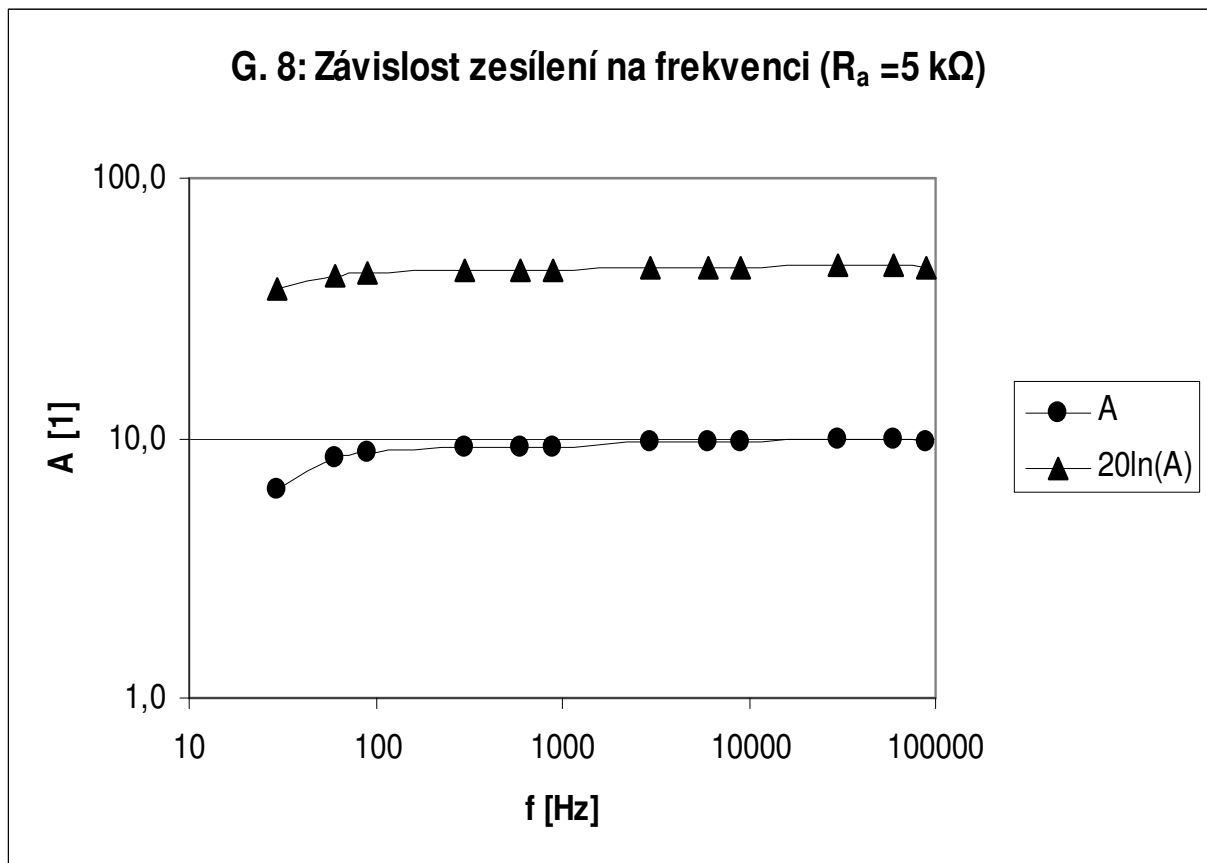
Tab. 7 – Naměřené a vypočtené hodnoty frekvenční závislosti zesílení ($R_a = 100 \text{ k}\Omega$)

$f [\text{Hz}]$	$U_v [\text{V}]$	$A [1]$	$20 \cdot \ln(A) [1]$
30	7,20	36,0	71,7
60	9,36	46,8	76,9
90	9,84	49,2	77,9
300	10,08	50,4	78,4
600	10,32	51,6	78,9
900	10,32	51,6	78,9
3000	10,32	51,6	78,9
6000	9,84	49,2	77,9
9000	9,36	46,8	76,9
30000	6,24	31,2	68,8
60000	3,36	16,8	56,4
90000	2,16	10,8	47,6



Tab. 8– Naměřené a vypočtené hodnoty frekvenční závislosti zesílení ($R_a = 5\text{ k}\Omega$)

f [Hz]	U_v [V]	A [1]	$20 \cdot \ln(A)$ [1]
30	1,28	6,4	37,1
60	1,68	8,4	42,6
90	1,76	8,8	43,5
300	1,84	9,2	44,4
600	1,84	9,2	44,4
900	1,84	9,2	44,4
3000	1,92	9,6	45,2
6000	1,92	9,6	45,2
9000	1,92	9,6	45,2
30000	2,00	10,0	46,1
60000	2,00	10,0	46,1
90000	1,92	9,6	45,2

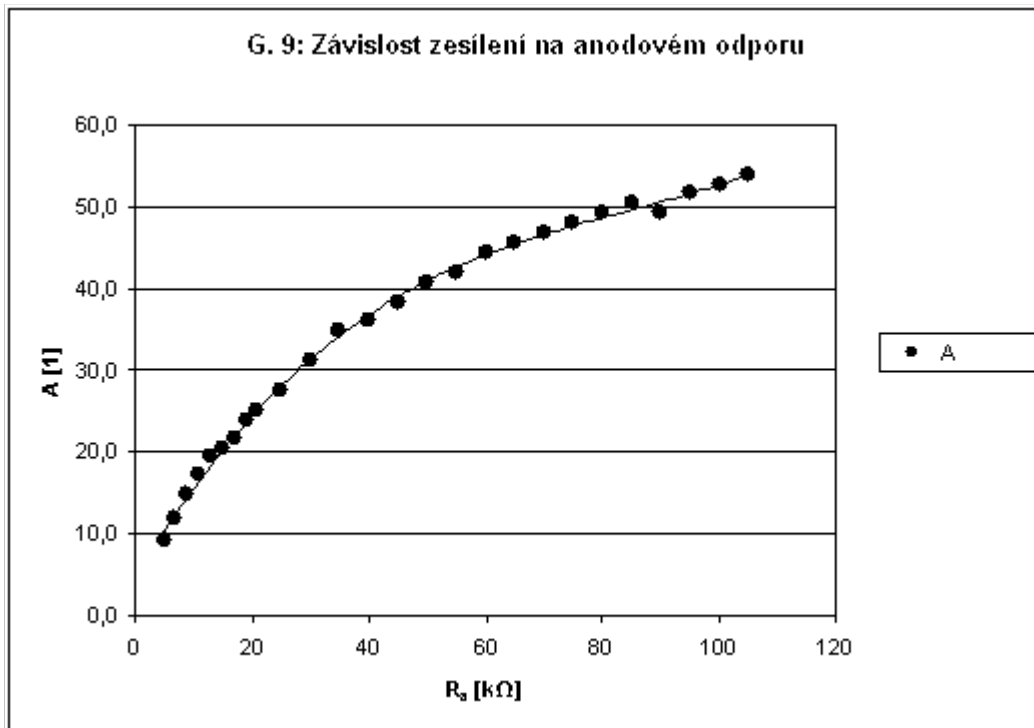


Úkol 3 – měření závislosti zesílení na anodovém odporu

Závislost byla měřena při anodovém napětí 120V, velikosti mřížkového napětí 1V, vstupní frekvenci 1kHz a vstupním napětí 0,2V. Naměřené a vypočtené hodnoty ukazuje Tab. 9 a graficky je zachycuje G. 9.

Tab. 9– Naměřené a vypočtené hodnoty závislosti zesílení na anodovém odporu

R_a [k Ω]	U_v [V]	A [l]
5	1,84	9,2
7	2,40	12,0
9	2,96	14,8
11	3,44	17,2
13	3,92	19,6
15	4,08	20,4
17	4,32	21,6
19	4,80	24,0
21	5,04	25,2
25	5,52	27,6
30	6,24	31,2
35	6,96	34,8
40	7,20	36,0
45	7,68	38,4
50	8,16	40,8
55	8,40	42,0
60	8,88	44,4
65	9,12	45,6
70	9,36	46,8
75	9,60	48,0
80	9,84	49,2
85	10,08	50,4
90	9,84	49,2
95	10,32	51,6
100	10,56	52,8
105	10,80	54,0



Diskuze výsledků

Největších nepřesností při měření jsme se dopustili při měření malých proudů, které byly důsledkem vyšších mřížkových napětí. Při měření anodových charakteristik totiž triodou do jistého napětí procházel jen proud, který nebyl použitým přístrojem zaznamenán, a i při nejvyšším použitém anodovém napětí byl velmi malý. Tato nepřesnost se potom negativně promítla do přesnosti určování pracovních bodů. Dostali jsme tak velkou relativní chybu, která však byla důsledkem skutečně malého anodového proudu. I přes tyto nepřesnosti jsme však dosáhli dobré shody průběhu anodové charakteristiky s předpokládaným třípolovinovým zákonem.

Při měření frekvenční závislosti zesílení jsme zjistili, že pro provoz triody je optimálnější vyšší anodový odpor, jelikož tak dosáhla několikanásobně vyššího zesílení. Toto zesílení však stejně bylo o hodně nižší, než je katalogizované, což můžeme přisuzovat jednak ne zcela optimálně nastaveným podmínkám, a jednak jisté ztrátě emisivity katody během let používání triody. Při mezních frekvencích jsme pozorovali výraznou ztrátu zesilovacích schopností triodového zesilovače v důsledku činnosti vazebních členů a parazitních kapacit samotné triody.

Závěr

Byly změřeny anodové charakteristiky triody. Výsledky ukazují Tab. 1 – Tab. 6, graficky je zachycují G. 1 – G. 6.

Byla změřena závislost zesílení na frekvenci vstupního signálu. Výsledky ukazují Tab. 7 a Tab. 8, graficky je zachycují G. 7 a G. 8.

Byla změřena závislost zesílení na velikosti anodového odporu. Výsledky ukazuje Tab. 9 a graficky je zachycuje G. 9.

Anodové charakteristiky byly zpracovány graficky v průběhu úlohy č. 1 a byly do nich vyznačeny oblasti maximální anodové ztráty, obě zatěžovací přímky a také byly určeny pracovní body. Ostatní úlohy taktéž obsahují grafická zpracování předepsaných parametrů.

Použitá literatura

- [1] J.Englich, Zpracování výsledků fyzikálních měření, Praha, 2000
- [2] Studijní materiály Praktika II., úloha XV,
http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_215.pdf