Fyzikální praktikum č.: 2

Datum: 15.12.2004
Vypracoval: Tomáš Henych

Teplota: 24,5 °C
Tlak: 998 mbar
Vlhkost: 28 %

Název: Charakteristiky nelineárních prvků. Princip zesilovače napětí.

Úkol:
a) Změřte výstupní charakteristiky unipolárního tranzistoru pro pět hodnot napětí na hradle.
b) Změřte převodní charakteristiku pro jednu hodnotu napětí na kolektoru.
c) V zadaném pracovním bodě určete strmost, vnitřní odpor a zesilovací činitel tranzistoru a ověřte platnost Barkhausenovy rovnice.
d) Pro zadaný zatěžovací odpor, napětí zdroje a pracovní bod určete dynamickou strmost a napěťové zesílení. Řešte graficky i početně a porovnejte výsledky.
e) Napěťové zesílení změřte na zesilovači.(*)

Teorie úlohy:
ad a) V unipolárním tranzistoru se na vedení proudu podílí pouze jeden typ nositelů – elektrony nebo díry. Majoritní nositelé tvoří tzv. kanál. Jeho přívody jsou emitor a kolektor. Proud tekoucí kanálem ovlivňuje napětí, které se vkládá mezi emitor a elektrodu, která je od kanálu izolovaná a jmenuje se hradlo. Výstupní charakteristika tranzistoru je závislost kolektorového (výstupního) proudu I_C na kolektorovém (výstupním) napětí U_C, tedy $I_C = f(U_C)$ při konstantním hradlovém napětí U_g.
ad b) Statická převodní charakteristika tranzistoru je závislost kolektorového (výstupního) proudu I_C na hradlovém napětí U_g, tedy $I_C = f(U_g)$ při konstantním kolektorovém napětí U_C.
ad c) Pracovní bod určíme jako průsečík křivky výstupní charakteristiky a tzv. zatěžovací přímky, která má rovnici $I_C = \frac{-1}{R_z} U_C - \frac{E}{R_z}$, kde R_z je zatěžovací odpor (viz dále) a E je napětí kolektorového zdroje. Derivace statické převodní charakteristiky se nazývá statická strmost tranzistoru $S = \left(\frac{\partial I_C}{\partial U_g} \right)_{U_g}$. Derivace výstupní charakteristiky určuje vnitřní odpor tranzistoru $R_i = \left(\frac{\partial U_C}{\partial I_C} \right)_{U_g}$, zesilovací činitel je potom $\mu = \left(\frac{\partial U_C}{\partial U_g} \right)_{I_C}$. Jeho převrácená hodnota se nazývá průnik $D = \frac{1}{\mu}$. Takto definované veličiny splňují Barkhausenovu rovnici: $SR_i D = 1$.
ad d) Pokud chceme studovat funkci tranzistoru jako zesilovače, zapojíme do obvodu zatěžovací neboli pracovní odpor R_z. Dynamickou strmost definujeme jako $S_d \equiv \frac{dI_C}{dU_g} = \frac{S}{1 + \frac{R_z}{R_i}}$ a zesílení jako

$$A \equiv \frac{dU_C}{dU_g} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_z}} = -S_d R_z$$

ad e) Na osciloskop přivedeme napětí z generátoru a kolektorové napětí. Změna hradlového napětí je $\Delta U_g = 2u_{m1}$ a změna kolektorového napětí $\Delta U_C = 2u_{m2}$, kde u_{m1} resp. u_{m2} jsou amplitudy vstupního resp. výstupního napětí. Odečítáme je přímo na osciloskopu.

Výsledky:

ad a)

$\frac{U_C}{V}$	$\frac{I_C}{mA}$
1,2	0,996
1,4	1,165
1,6	1,274
1,8	1,385
2,0	1,500
2,4	1,715
2,6	1,805
3,2	2,065
3,3	2,082
3,5	2,160
4,2	2,358
4,6	2,450
4,8	2,490
5,0	2,525
5,2	2,557
5,5	2,600
6,0	2,663
6,7	2,722
7,0	2,736

$U_g = 0{,}04\ V$

$\frac{U_C}{V}$	$\frac{I_C}{mA}$
0,2	0,228
1,1	1,040
1,7	1,496
2,0	1,727
2,6	2,034
2,7	2,101
3,1	2,321
3,5	2,475
3,8	2,629
4,6	2,871
4,9	2,944
5,4	3,073
5,7	3,122
6,1	3,185
6,3	3,225
6,5	3,243
7,0	3,299
7,5	3,342
8,3	3,399
9,3	3,435

$U_g = 1{,}68\ V$

$\frac{U_C}{V}$	$\frac{I_C}{mA}$
1,2	0,803
1,4	0,926
1,7	1,065
1,9	1,146
2,3	1,278
3,0	1,482
3,5	1,585
3,7	1,629
4,0	1,672
4,5	1,734
5,0	1,771
5,4	1,791
5,7	1,806
6,0	1,817
6,8	1,838
7,1	1,845
7,6	1,854

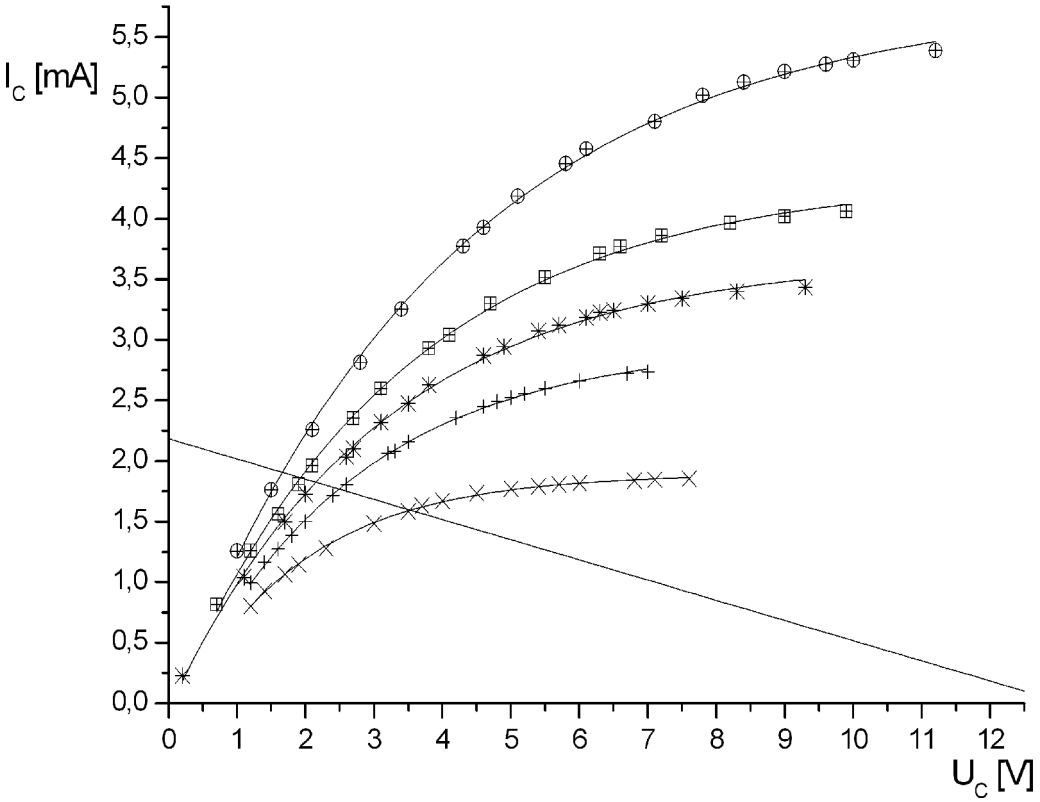
$U_g = -3{,}03\ V$

$\frac{U_C}{V}$	$\frac{I_C}{mA}$
0,7	0,816
1,2	1,260
1,6	1,562
1,9	1,806
2,1	1,963
2,7	2,352
3,1	2,599
3,8	2,932
4,1	3,041
4,7	3,299
5,5	3,516
6,3	3,713
6,6	3,769
7,2	3,860
8,2	3,966
9,0	4,020
9,9	4,062

$U_g = 3{,}24\ V$

$\frac{U_C}{V}$	$\frac{I_C}{mA}$
1,0	1,256
1,5	1,763
2,1	2,261
2,8	2,814
3,4	3,252
4,3	3,772
4,6	3,928
5,1	4,186
5,8	4,455
6,1	4,576
7,1	4,803
7,8	5,018
8,4	5,128
9,0	5,215
9,6	5,276
10,0	5,310
11,2	5,388

$U_g = 6{,}14\ V$



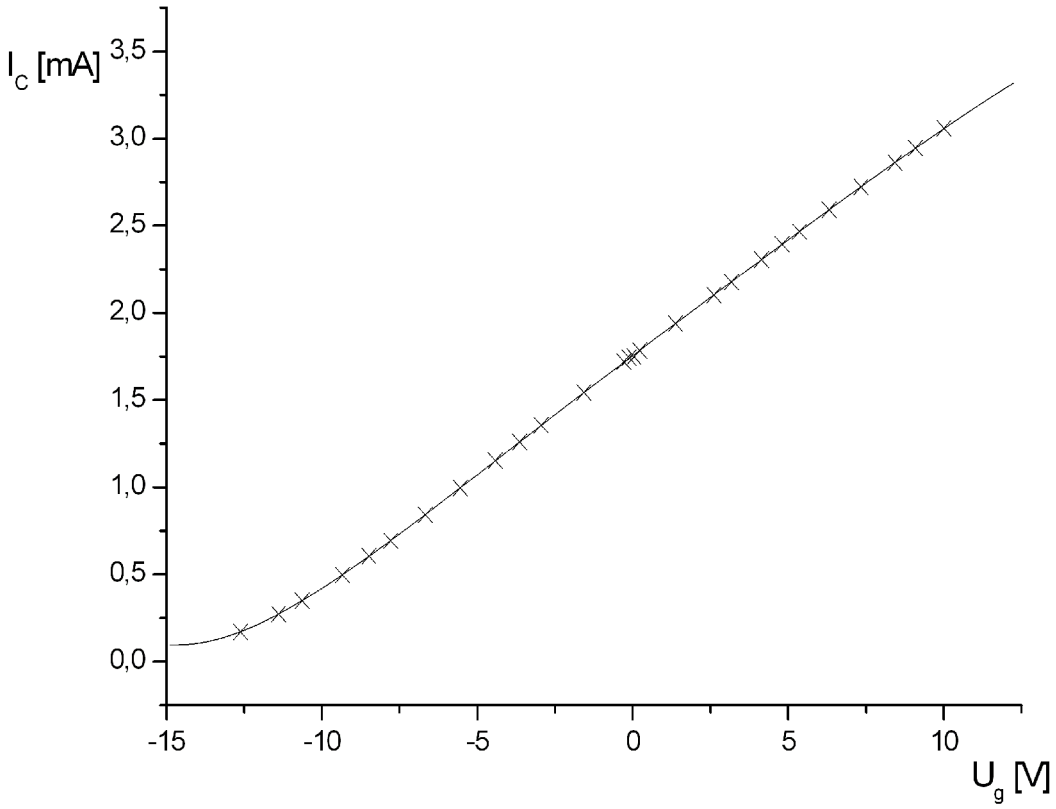
Graf 1: Výstupní charakteristiky

ad b)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\frac{U_g}{V}$	0,04	0,22	1,37	2,60	3,16	4,13	4,80	5,35	6,31	7,34	8,43	9,09	10,00
$\frac{I_C}{mA}$	1,750	1,785	1,939	2,103	2,178	2,306	2,394	2,466	2,592	2,723	2,862	2,945	3,058

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$\frac{U_g}{V}$	0,12	0,29	1,58	2,95	3,65	4,42	5,55	6,68	7,79	8,48	9,34	10,63	11,4	12,62
$\frac{I_C}{mA}$	1,744	1,720	1,543	1,355	1,259	1,153	0,996	0,842	0,693	0,604	0,496	0,349	0,273	0,170

Opačná polarita



Graf 2: Statická převodní charakteristika

ad c)

Statickou strmost, vnitřní odpor a zesilovací činitel resp. průnik jsem stanovil z grafu tak, že jsem postupně zmenšoval interval hodnot U_C, I_C a U_g kolem pracovního bodu a pro rozdíl jejich krajních hodnot stanovoval jednotlivé charakteristiky. Chybu těchto veličin jsem určil z chyby odečítání dat z grafu a potom ze zákona šíření chyb. Relativní chyby jsou tedy: $\delta_S = \sqrt{\delta_{I_C}^2 + \delta_{U_g}^2}$ $\delta_{R_i} = \sqrt{\delta_{U_C}^2 + \delta_{I_C}^2}$ $\delta_D = \sqrt{\delta_{U_C}^2 + \delta_{U_g}^2}$ a relativní chyba pro ověření Barkhausenovy rovnice je $\delta_{SR_iD} = \sqrt{\delta_S^2 + \delta_{R_i}^2 + \delta_D^2}$.

$\frac{\Delta U_C}{V}$	0,936	0,760	0,542	0,326	0,108	
$\frac{\Delta I_C}{mA}$	0,282	0,219	0,156	0,093	0,031	
$\frac{\Delta U_g}{V}$	2,101	1,325	1,043	0,637	0,226	
$\frac{s}{\Omega^{-1}}$	0,000134	0,000165	0,000150	0,000146	0,000137	$S=(0{,}000146\pm0{,}000009)\Omega^{-1}$
s_s	0,000001	0,000002	0,000002	0,000003	0,000009	
$\frac{R_i}{\Omega}$	3319	3470	3474	3505	3484	$R_i=(3450\pm234)\Omega^{-1}$
s_{R_i}	25	33	46	78	234	
μ	0,446	0,574	0,520	0,512	0,478	
D	2,245	1,743	1,924	1,954	2,093	$D=(1{,}992\pm0{,}043)$
s_D	0,005	0,005	0,008	0,013	0,043	
$SR_i D$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	$SR_i D=(1{,}00\pm0{,}10)$
$s_{SR_i D}$	0,01	0,01	0,02	0,03	0,1	

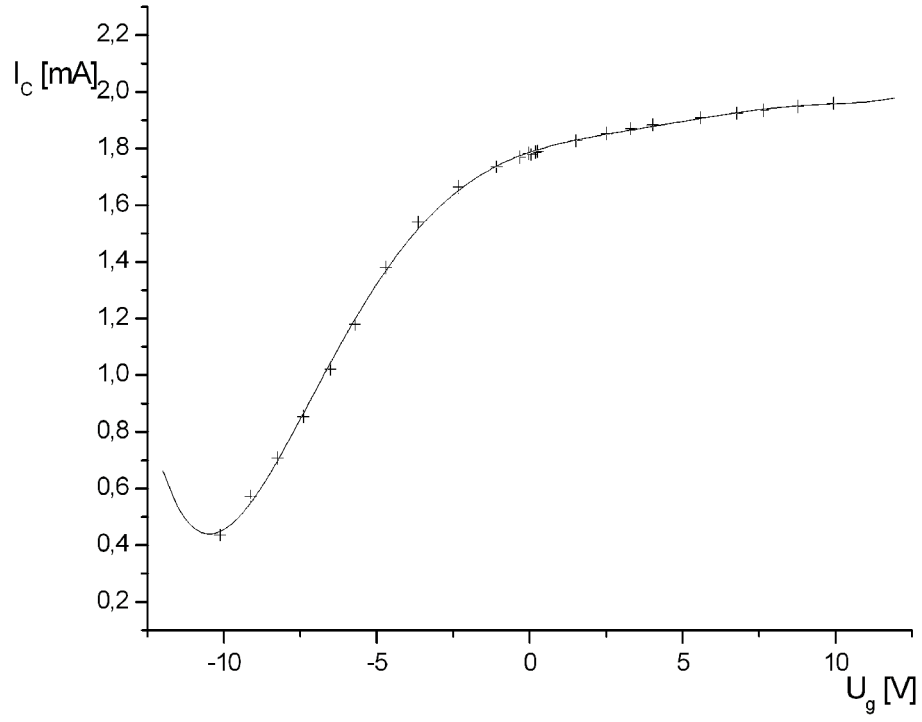
Statické charakteristiky tranzistoru

ad d)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\frac{U_g}{V}$	0,04	0,19	0,25	1,51	2,50	3,30	4,02	5,58	6,77	7,63	8,77	9,93
$\frac{I_C}{mA}$	1,779	1,788	1,790	1,828	1,853	1,870	1,884	1,909	1,925	1,936	1,948	1,960

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\frac{U_g}{V}$	0,04	0,33	1,09	2,33	3,65	4,71	5,72	6,52	7,41	8,25	9,13	10,13
$\frac{I_C}{mA}$	1,783	1,769	1,736	1,664	1,541	1,380	1,180	1,021	0,854	0,708	0,572	0,436

Opačná polarita



Graf 3: Dynamická převodní charakteristika

$\frac{\Delta U_C}{V}$	-0,219	-0,186	-0,165	-0,167	-0,047
$\frac{\Delta U_g}{V}$	1,077	0,860	0,752	0,600	0,276
$\frac{\Delta I_C}{mA}$	0,039	0,033	0,02700	0,024	0,010
$\frac{S_d}{\Omega^{-1}}$	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004	0,00004
s_{S_d}	0,000002	0,000002	0,000003	0,000003	0,000007
$\frac{S}{1+\frac{R_z}{R_i}}$	0,00005	0,00006	0,00005	0,00005	0,00005
s_{S_d}	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003
$\frac{\Delta U_C}{\Delta U_g}$	-0,203	-0,216	-0,219	-0,278	-0,170
s_A	0,002	0,002	0,003	0,003	0,007
$-S_d R_z$	-0,287	-0,363	-0,329	-0,323	-0,302
$s_{-S_d R_z}$	0,015	0,022	0,025	0,027	0,062

$U_C = 2{,}5\ V$
$E = 13{,}1\ V$
$R_z = 6\ k\Omega$

$S_d = (0{,}000040 \pm 0{,}000007)\,\Omega^{-1}$

$S_d^v = (0{,}000052 \pm 0{,}000003)\,\Omega^{-1}$

$A = (-0{,}218 \pm 0{,}007)$

$A^v = (-0{,}321 \pm 0{,}061)$

Dynamické charakteristiky tranzistoru

Postup určování dynamických charakteristik je stejný jako v předchozím případě. Chyby jsou opět $\delta_{S_d} = \sqrt{\delta_{I_C}^2 + \delta_{U_g}^2}$ a $\delta_A = \sqrt{\delta_{U_C}^2 + \delta_{U_g}^2}$, chyby měření proudu a napětí jsem opět odhadl z chyby čtení hodnot z grafu. Horním indexem *v* jsou označeny hodnoty vypočtené. Ty slouží k ověření výsledků.

ad e)
Podle osciloskopu vyšlo zesílení $A = (-0{,}24 \pm 0{,}03)$, chybu jsem určil z chyby čtení hodnot na osciloskopu.

Závěr: Výstupní charakteristiky vyšly přibližně podle předpokladu. Platnost Barkhausenovy rovnice jsem ověřil s poměrně vysokou chybou asi deseti procent. Dynamická strmost tranzistoru odečtená z grafu a vypočtená se od sebe poměrně výrazně liší. Chyba je jednak v odečítání hodnot z grafu, jednak v závislosti proložené naměřenými hodnotami. Vypočtená hodnota zesílení je dost odlišná od hodnoty odečtené z grafu a z osciloskopu.