

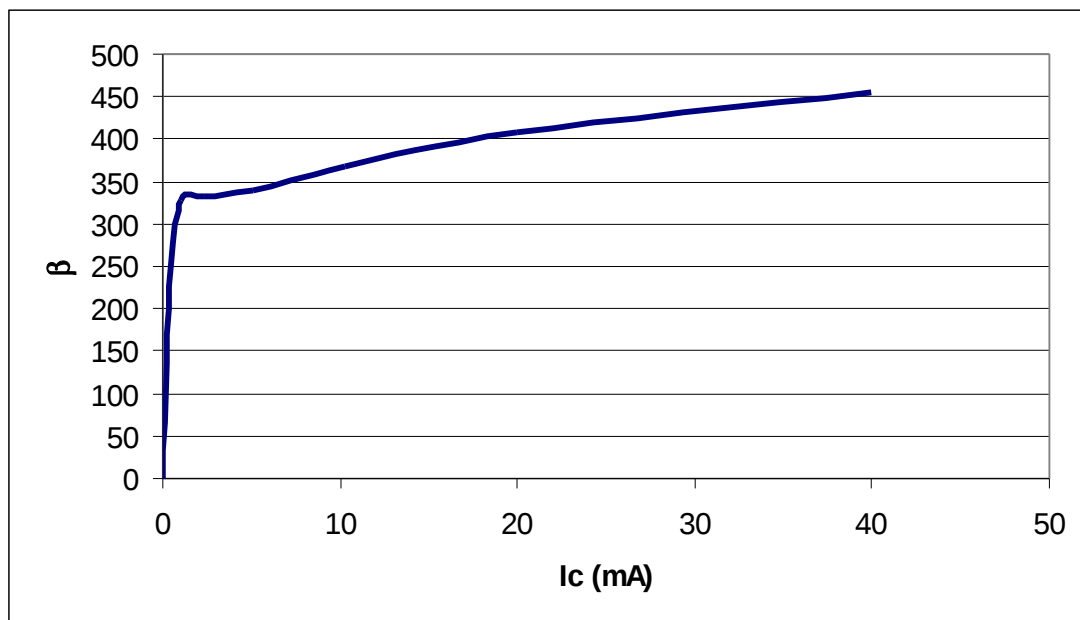
## POROČILO O OPRAVLJENI VAJI

### Bipolarni tranzistor

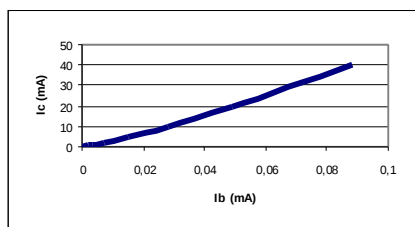
Tranzistor je polprevodniški element s katerim lahko izvedemo mnogo električnih funkcij, kot so napetostno in tokovno ojačanje signalov, močnostna stikala,...

$I_b$ (mA)	$I_c$ (mA)	$\beta$
0	0	0
0,002	0,5	250
0,003	0,986	329
0,007	2,32	331
0,015	5,09	339
0,028	10,29	368
0,049	20	408
0,088	40	455

Tabela 1: Faktor tokovnega ojačanja  $\beta$

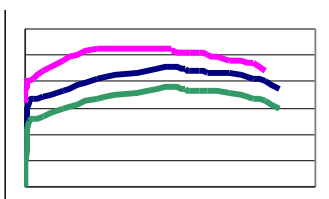


Graf 1: Faktor tokovnega ojačanja  $\beta$  v odvisnosti od  $I_c$



V aktivnem področju delovanja tranzistorja je kolektorski tok krmiljen z baznim tokom. Njuna odvisnost je vsaj približno linearna zaradi česa lahko govorimo o faktorju tokovnega ojačanja  $\beta$ , ki pove kolikokrat večji je kolektorski tok ( $I_c$ ) od baznega ( $I_b$ ). Pri tem veljata naslednji relaciji:

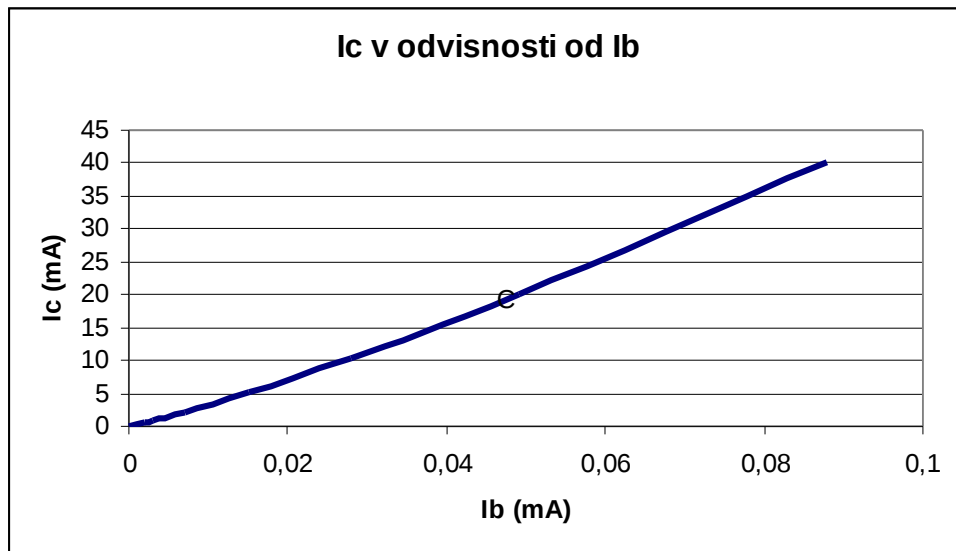
$$\beta = I_c / I_b \text{ in } I_c = \beta \cdot I_b$$



$\beta$  doseže  $\beta_{max}$  pri določenem kolektorskem toku (ki je pri različnih tranzistorjih drugačen) nato začne padati. Pravtako pa je  $\beta$  odvisen od temperature, z višanjem temperature se  $\beta$  viša (modra 20°C, roza +50°C, zelena -75°C)

Ube	Ib (mA)	Ic (mA)	Uce	$\beta$
0	0	0	15	0
0,59	0,002	0,5	15	250
0,61	0,003	0,986	15	329
0,62	0,007	2,32	15	331
0,62	0,015	5,09	15	339
0,58	0,028	10,29	15	368
0,55	0,049	20	15	408
0,47	0,088	40	15	455

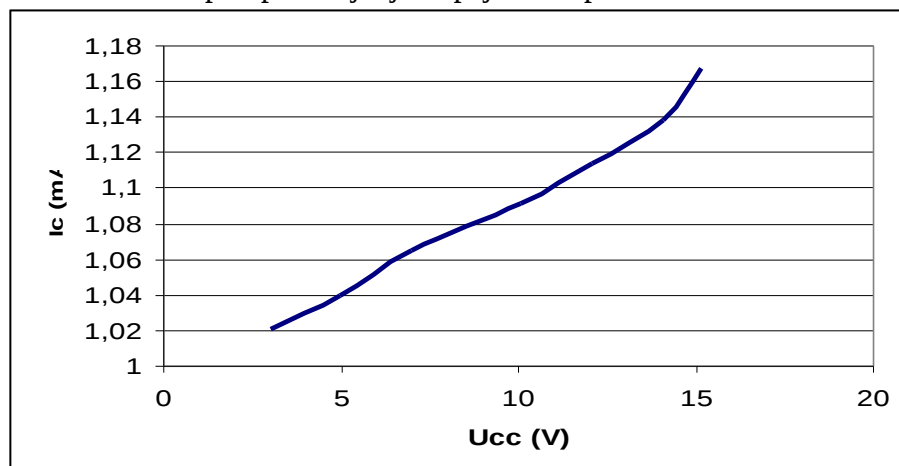
Tabela 2: Vhodno izhodni parametri tranzistorja



Graf 2: Kolektroski (izhodni) tok v odvisnosti od baznega

Ucc (V)	Ic (mA)	Ib (mA)	Ube (V)
3,003	1,021	0,004	0,62
4,96	1,04	0,004	0,62
7	1,065	0,004	0,62
10,07	1,091	0,004	0,61
12,06	1,114	0,004	0,61
14,07	1,138	0,004	0,61
15,14	1,167	0,004	0,6

Tabela 4: Kolektroski tok Ic je se malo spreminja, pri spreminjanju napajalne napetosti Ucc



## Delovna točka tranzistorja

Pri realizaciji tranzistorskih vezji, kjer tranzistor deluje v aktivnem področju delovanja, izkoriščamo lastnost tranzistorja, da njegov bazni tok  $I_b$  krmili kolektorski  $I_c$ . Bazni tok je odvisen od napetosti  $U_{be}$ , ker gre za I/U karakteristiko pn spoja, med njima velja diodna karakteristika

Delovno točko stabiliziramo na več načinov, eden izmed načinov je s tokovno povratno zvezo, kjer v emitorsko vejo vgradimo upor  $R_e$ , s tem uporom tudi močno zmanjšamo vpliv temperature na delovno točko tranzistorja.

$U_b$ (V)	$I_b$ (mA)	$I_c$ (mA)	$U_e$ (V)	$U_{cc}$ (V)	$U_{ce}$ (V)
4,8	0,014	4,25	4,18	15	10,82
1,28	0,002	0,72	0,069	15	14,931
3,14	0,008	2,57	2,52	15	12,48
5,73	0,017	5,19	5,11	15	9,89
6,81	0,02	6,29	6,2	15	8,8
8,32	0,025	7,82	7,71	15	7,29
9,96	0,31	9,48	9,34	15	5,66

Tabela 3: Vhodno izhodni parametri tokovne povratne zveze  $R_e=1k\Omega$

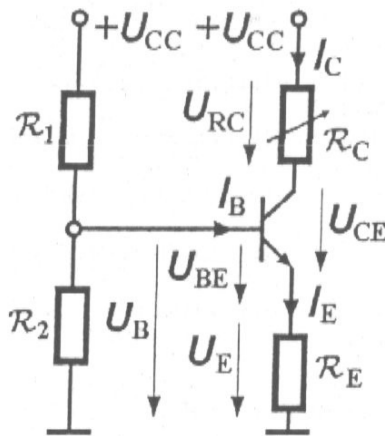
Vhodna notranja upornost je  $\beta$  krat večja od vrednosti emitorskega upora. To je posledica tega da se napetost  $U_e$  spremeni približno toliko kot  $U_b \rightarrow$

$$\Delta I_e = \Delta U_e / R_e \approx \Delta U_b / R_e$$

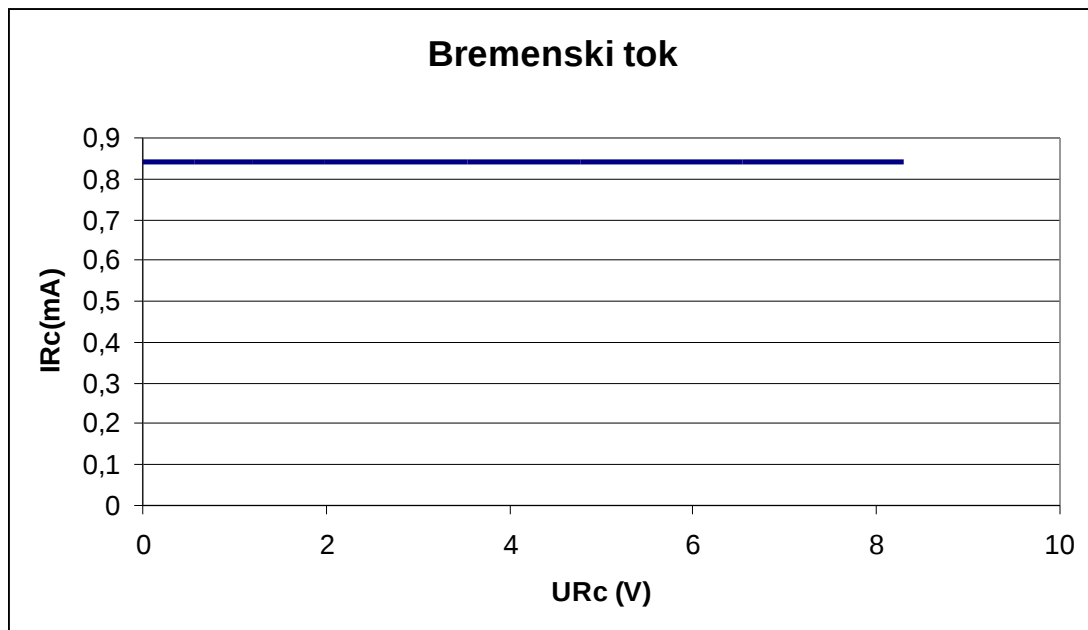
$$\text{Torej } r_{vh} = \beta * R_e$$

**Tokovni vir**

Glavna naloga tokovnega vira je da daja konstantni tok ne glede na napetost



U <sub>rc</sub> (V)	I <sub>rc</sub> (mA)
0,003	0,84
0,57	0,84
1,192	0,84
1,994	0,84
3,531	0,84
4,77	0,84
6,54	0,84
8,29	0,84

**Bremenski tok**

Nortonov tok in notranja upornost

$$I_c = (U_b - 0,6 \text{ V}) / R_e - \text{Nortonov tok}$$

$$R_2 = - \partial U_{rc} / \partial I_c \approx - \Delta U_{rc} / \Delta I_c - \text{Nortonova notranja upornost}$$

Izračunana I<sub>c</sub> in R<sub>2</sub> za zgornji primer

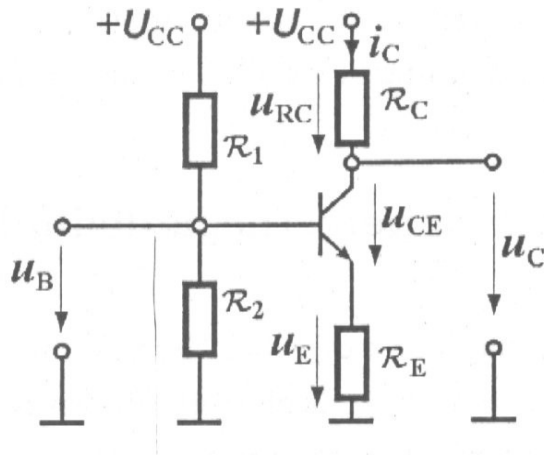
$$I_c = (1,6 \text{ V} - 0,6 \text{ V}) / 1 \text{ k}\Omega = 1 \text{ mA}$$

$$R_2 = -(1,19 \text{ V} / 1 \text{ mA}) = 1190 \Omega$$

<table border="1"> <thead> <tr> <th>I<sub>c</sub> (mA)</th> <th>U<sub>cc</sub> (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0,006</td><td>5,01</td></tr> <tr><td>0,116</td><td>7,06</td></tr> <tr><td>0,288</td><td>9,09</td></tr> <tr><td>0,463</td><td>11</td></tr> <tr><td>0,646</td><td>12,96</td></tr> <tr><td>0,845</td><td>15,05</td></tr> </tbody> </table>	I <sub>c</sub> (mA)	U <sub>cc</sub> (V)	0,006	5,01	0,116	7,06	0,288	9,09	0,463	11	0,646	12,96	0,845	15,05	<table border="1"> <thead> <tr> <th>I<sub>c</sub> (mA)</th> <th>U<sub>cc</sub> (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2,59</td><td>5,05</td></tr> <tr><td>2,84</td><td>6,98</td></tr> <tr><td>3,01</td><td>9,07</td></tr> <tr><td>3,13</td><td>11,1</td></tr> <tr><td>3,22</td><td>13,05</td></tr> <tr><td>3,3</td><td>15,06</td></tr> </tbody> </table>	I <sub>c</sub> (mA)	U <sub>cc</sub> (V)	2,59	5,05	2,84	6,98	3,01	9,07	3,13	11,1	3,22	13,05	3,3	15,06
I <sub>c</sub> (mA)	U <sub>cc</sub> (V)																												
0,006	5,01																												
0,116	7,06																												
0,288	9,09																												
0,463	11																												
0,646	12,96																												
0,845	15,05																												
I <sub>c</sub> (mA)	U <sub>cc</sub> (V)																												
2,59	5,05																												
2,84	6,98																												
3,01	9,07																												
3,13	11,1																												
3,22	13,05																												
3,3	15,06																												
Izvor z delilnikom napetosti	Izvor z Zener diodo																												

Nortonov tok v odvisnosti od napajalne napetosti

## Napetostni ojačevalnik



Vezje je linearni napetostni ojačevalnik, če se izhodna napetost spreminja sorazmerno s spremembo napetosti, pri čemer je sorazmernostna konstanta med obema spremembama večja od ena. Na primer, če vezje vzbujamo s sinusnim signalom amplitude 1V in dobimo na izhodu sinusni signal amplitude 3V, imamo opravka z napetostnim ojačevalnikom, ki ima ojačanje 3.

Bistvo delovanja je prav v tokovnem izvoru. Tok  $I_C$  je napetostno krmiljen.

Sprememba toka  $i_C$  je proporcionalna spremembi napetosti  $u_B$  po naslednji enačbi:

$$i_C = (u_B - 0,6V) / R_E \quad \Delta i_C = \Delta u_B / R_E$$

Opozorjamo, da so v enačbi uporabljane majhne črke za označevanje kolektorskega toka in bazne napetosti, ker sedaj govorimo o trenutnih veličinah signalov in ne več o enosmernih veličinah, ki predstavljajo statično delovno točko tranzistorskega vezja. Napetostni ojačevalnik dobimo, če tokovni izvor priklopimo na konstantno breme  $R_C$ . Sprememba izhodne napetosti je proporcionalna spremembi toka  $i_C$  in s tem tudi spremembi vhodne napetosti  $u_B$  po naslednji enačbi:

$$\Delta u_C = -R_C \cdot \Delta i_C = -(R_C / R_E) \cdot \Delta u_B$$

Če je kolektorski upor  $R_C$  večji od emitorskega  $R_E$ , je sprememba izhodne napetosti večja od vhodne napetosti, s čimer dobimo napetostni ojačevalnik. Napetostno ojačanje  $A_u$  je definirano kot sprememba izhodne napetosti  $\Delta u_C$  proti pripadajoči spremembi vhodne napetosti  $\Delta u_B$ , po naslednji enačbi:

$$A_u = -(\Delta u_C / \Delta u_B) = R_C / R_E$$

Ker dvig vhodne napetosti povzroči padec izhodne napetosti in obratno, pravimo, da gre za invertirajoč ojačevalnik. Fazni zamik med izhodnim in vhodnim signalom je  $180^\circ$ . Če nas to moti izvedemo ojačanje z dvema ojačevalnikoma in dobimo fazni zamik  $2 \cdot 180^\circ = 360^\circ = 0^\circ$ .

### Dimenzioniranje napetostnega delilnika:

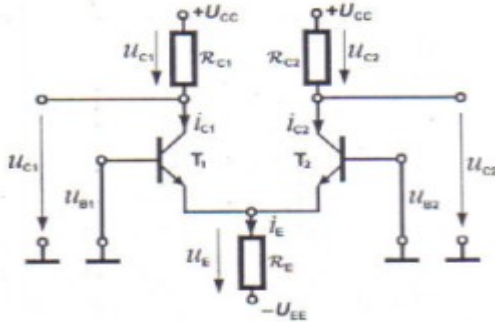
Ojačevalnik, ki ga napajamo z  $U_{CC} = 12V$ , naj ima ojačanje 2, kar dosežemo z izbiro vrednosti  $R_C = 2 \cdot R_E$ . Konkretnih upornosti še ne izberemo. Vendar zaradi lažje razlage predpostavimo, da velja  $R_C = 2k\Omega$  in  $R_E = 1k\Omega$ .

Če se napetost  $u_B$  spusti pod  $0,6V$  se tranzistor zapre. Padec na uporu  $R_C$  je enak  $0V$  in izhodna napetost je konstantno enaka napetosti  $U_{CC}$ , s čimer vezje izgubi ojačevalne lastnosti. Najnižja napetost  $u_{Bmin}$  je  $0,6V$ .

Pri naraščanju napetosti  $u_B$  se niža napetost  $u_{CE}$ , kar se ustavi pri napetosti  $U_{CEsat}$ . Od tu naprej vezje izgubi ojačevalne lastnosti. Najbolje dimenzionirana napetost  $U_B$  je

postavljena na sredino napetosti  $u_{Bmax}$  in  $u_{Bmin}$ , s čimer je amplituda vhodnega signala maksimalna na izbrano ojačanje in napajalno napetost.

### DIFERENCIALNI OJAČEVALNIK



Pri prejšnji vaji smo izdelali napetostni ojačevalnik z bipolarnim tranzistorjem in spoznali dve glavni oviri za njegovo uporabo v merilnih in senzorskih sistemih. Prva težava nastane zaradi prednapetosti na bazi tranzistorja, ki zagotavlja izbrano delovno točko ojačevalnika. Ker sta v splošnem enosmerna komponenta senzorjevega signala in bazna prednapetost

različni, ne smemo izvesti galvanske povezave senzorja z ojačevalnikom. Druga težava nastane zaradi sprememb parametrov elektronskih komponent, ki sestavljajo ojačevalnik. To povzroča lezenje, ki omejuje natančnost, s katero lahko odčitavamo senzorjev signal in s tem veličino, ki jo ponazarja. Obe težavi odpravimo z uporabo kapacitivne sklopitve, ki ne prevaja enosmerne komponente signala, s čimer dobimo izmenični ojačevalnik.

#### Protifazni in sofazni vhodni signal:

Če napetost enega od vhodov spremenimo za določeno vrednost npr 1V in če napetost drugega vhoda spremenimo za ravno toliko, vendar v nasprotno smer, govorimo o čistem protifaznem signalu. Vrednost proti faznega signala je enaka razliki napetosti  $u_{B1} - u_{B2} = 2V$ . Beseda protifazna pove, da imata spremembi napetosti nasprotni polariteti. O sofaznem signalu govorimo, ko iz začetnega stanja izvedemo enako spremembo obeh vhodnih napetosti. Splošni vhodni signal vsebuje proti fazno komponento napetosti. Sofazna komponenta, ki jo v nadaljevanju označujemo kot  $u_S$ , je enaka povprečni vrednosti obeh vhodnih napetosti, kar poudarja naslednja enačba:

$$u_S = (u_{B1} + u_{B2}) / 2$$

Proti fazna komponenta, za katero uporabljamo oznako  $u_D$ , je enaka razliki obeh vhodnih napetosti po sledeči enačbi. Indeks D v oznaki  $u_D$  poudarja, da gre za razliko oziroma diferenco dveh napetosti:

$$u_D = u_{B1} - u_{B2}$$

Pri uporabi diferencialnega ojačevalnika je ključnega pomena, da je proti fazna komponenta vhodnega signala močno ojačana, medtem ko je pri sofazni komponenti ojačanje izrazito manjše.

**Pomembno!** Kljub temu, da sta bazi obeh tranzistorjev na potencialu 0V, sta tranzistorja odprta. Emitorska veja je napajana z negativno napetostjo, zato je napetost  $u_{BE}$  lahko pozitivna tudi, če je  $u_{B1} = u_{B2} = 0V$ . To je ključna ugotovitev, saj lahko s pomočjo bipolarnega napajanja vzdržujemo poljubno delovno točko tranzistorja tudi, če sta bazi vezani na maso.

Sofazno ojačanje:

Sofazno ojačanje operacijskega ojačevalnika  $A_{uS}$  izračunamo po sledeči enačbi:  $A_{uS} = (R_{C1} + R_{C2}) / (4 * R_E)$

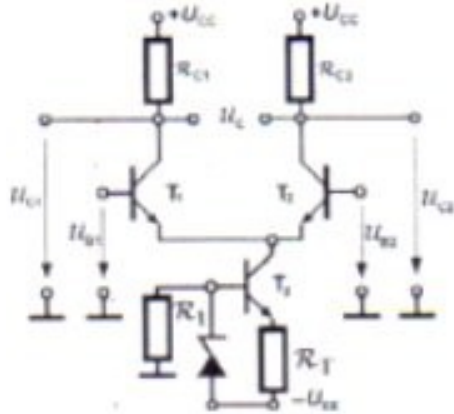
Proti fazno ojačanje:

S protifaznim ojačanjem vrednotimo, kolikšno je razmerje med spremembo izhodne napetosti  $\Delta u_C$  in spremembo protifazne napetosti  $\Delta u_D$  na vhodu. To definira sledeča enačba:  $A_{uP} = - (\Delta u_C / \Delta u_D)$

Negativni predznak v definiciji je zopet posledica invertirajočega ojačanja. Protifazno ojačanje je dosti večje od sofaznega, zato moramo pri analizi ojačevalnik vzbujati z bistveno manjšimi signali, kot smo to storili predhodno.

### Rejekcijski faktor:

Diferencialni ojačevalnik naj bi imel čim večje proti fazno ojačanje in čim manjše sofazno. Razmerje obeh ojačanj, ki ga podaja naslednja enačba, imenujemo rejekcijski faktor  $G$  ali CMRR (ang. common mode rejection ratio) common mode = sofazni signal  $G = \text{CMRR} = A_{up}/A_{us}$



To je eden pomembnejših parametrov, ki določa kvaliteto diferencialnega ojačevalnika.

**Večanje rejekcijskega faktorja:**

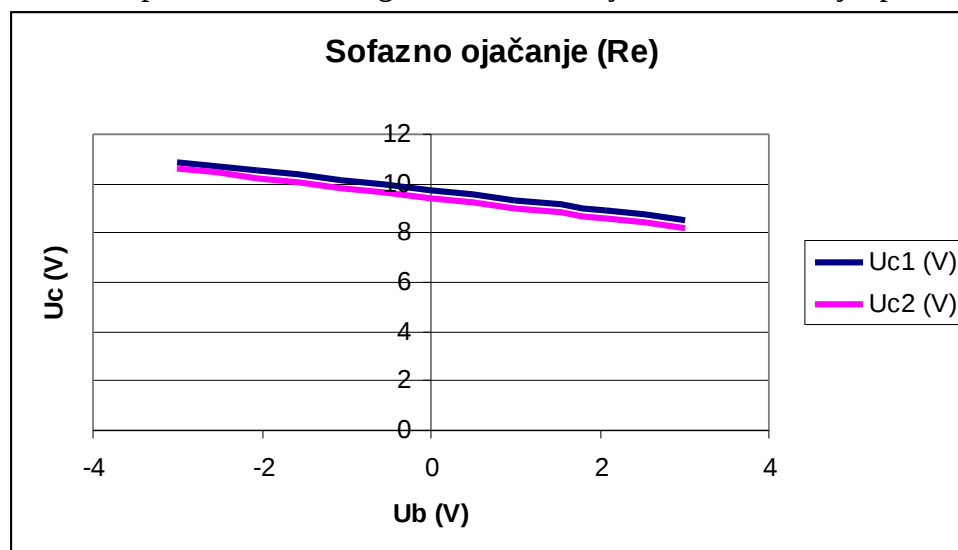
Zmanjšamo lahko kolektorski upor, kar ni ugodno, saj s tem zmanjšamo tudi protifazno ojačanje, zato CMRR ojačevalnika ostaja enak. Najboljša možnost je, da upor  $R_E$  zamenjamo s tokovnim izvorom.

Meritve:

Sofazno ojačanje:

$U_b$ (V)	$U_{c1}$ (V)	$U_{c2}$ (V)
-3	10,88	10,6
-2,07	10,52	10,23
-1,07	10,13	9,82
0	9,73	9,4
1	9,32	8,97
2,05	8,9	8,56
3	8,54	8,19

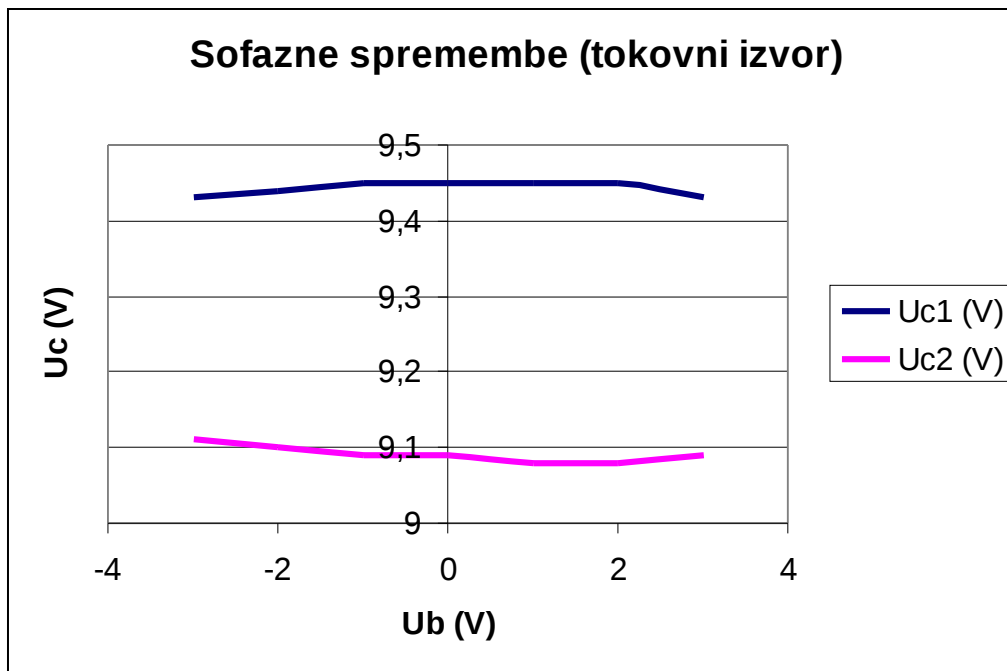
Sofazne spremembe izhoda glede na vhod, če je na emitorski veji upor  $R_E$



Sofazne spremembe

Ub (V)	Uc1 (V)	Uc2 (V)
-3	9,43	9,11
-2	9,44	9,1
-1	9,45	9,09
0	9,45	9,09
1	9,45	9,08
2	9,45	9,08
3	9,43	9,09

Sofazne spremembe, če je na emitorski veji tokovni izvor



Sofazno ojačanje je definirano kot:  $A_{us} = (A_{us1} + A_{us2}) / 2$

$$A_{us1} = \Delta U_{c1} / \Delta U_s$$

$$A_{us2} = \Delta U_{c2} / \Delta U_s$$

Kjer je  $\Delta U_{c1}$  sprememba izhodne napetosti,  $\Delta U_s$  sprememba sofaznega signala

$$A_{us1} = 0,01 \text{ V} / 1 \text{ V} = 0,01$$

$$A_{us2} = 0,01 \text{ V} / 1 \text{ V} = 0,01$$

$$A_{us} = (0,01 + 0,01) / 2 = 0,01$$



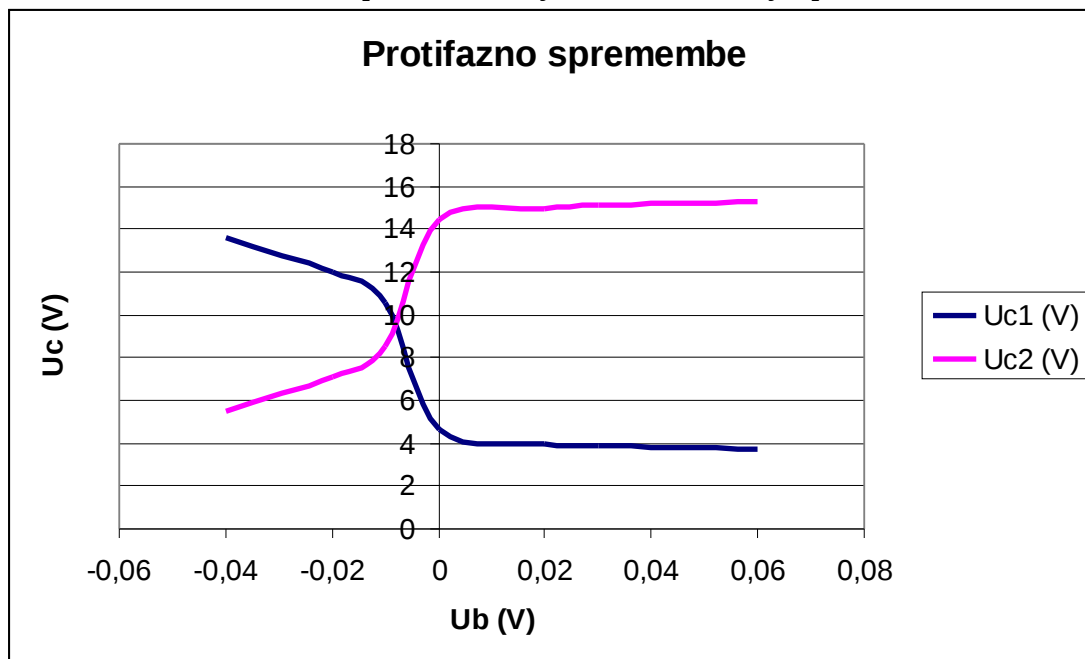
Če se na vhodu vezja protifazna napetost  $U_d$  spremeni za  $\Delta U_d$ , se spremenita napetosti obeh kolektorjev  $U_{c1}$  in  $U_{c2}$  za  $\Delta U_{c1}$  in  $\Delta U_{c2}$ . S tem se spremeni tudi napetost  $U_c$  za  $\Delta U_c$ :  $U_c = U_{c1} - U_{c2}$  oz.  $\Delta U_c = \Delta U_{c1} - \Delta U_{c2}$ .

Enačba za protifazno ojačanje:  $A_{up} = -(\Delta U_c / \Delta U_d)$

Protifazno ojačanje:

$U_b$ (V)	$U_{c1}$ (V)	$U_{c2}$ (V)
-3	15,45	3,78
-2	15,39	3,78
-0,04	13,61	5,53
-0,02	12,01	7,13
-0,01	10,55	8,57
0	4,62	14,41
0,02	3,99	15
0,03	3,86	15,12
0,06	3,7	15,26
2,06	2,077	15,35
2,98	2,36	15,35

Protifazne spremembe če je na emitorski veji upor  $R_e$

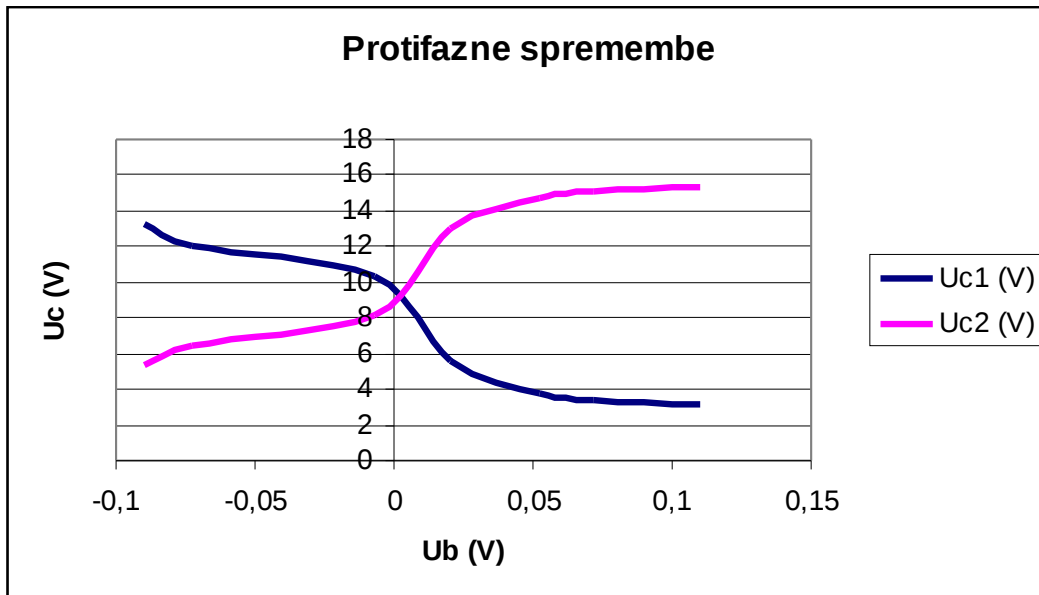


Protifazne spremembe, če je na emitorski veji upor  $R_e$

$U_{off} = -0,01$  V

Ub (V)	Uc1 (V)	Uc2 (V)
-3	15,42	3,27
-2,09	15,42	3,27
-0,09	13,27	5,32
-0,073	12,07	6,5
-0,007	10,37	8,2
0,02	5,55	12,97
0,052	3,75	14,77
0,072	3,45	15,05
0,11	3,22	15,28
2,06	3,14	15,35
2,88	3,13	15,35

Protifazne spremembe, če je na emitorski veji tokovni izvor



Protifazne spremembe, če je na emitorski veji tokovni izvor

Torej sofazno ojačanje je 0,01, medtem ko protifazno:

$$A_{up} = - (\Delta U_c / \Delta U_d) = (15,42 - 3,27) / (3/2) = 8,1$$

$$G = CMMR = A_{up} / A_{us} = 8,1 / 0,01 = 810$$

$$U_{off} = +0,01V$$