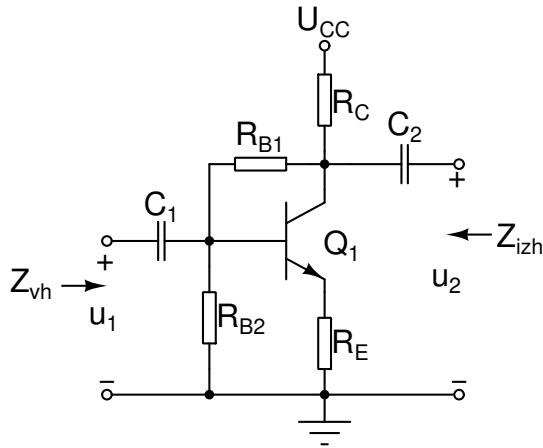


Vaja 1: Lastnosti dvo-vhodnega vezja

Naloga

Za vezje na sliki izmerite hibridne (h) parametre pri frekvenci $f = 5\text{kHz}$. Določite še napetostno ojačenje $A_u = \frac{u_2}{u_1}$ ter vhodno (Z_{vh}) in izhodno (Z_{izh}) impedanco.



$$U_{CC} = 20\text{V}, R_C = 4.7\text{k}\Omega, R_E = 47\Omega$$

$$R_{B1} = 180\text{k}\Omega, R_{B2} = 18\text{k}\Omega$$

$$C_1 = 0.1\mu\text{F}, C_2 = 47\mu\text{F}$$

Q_1 : BC546B bipolarni NPN tranzistor

Navodilo

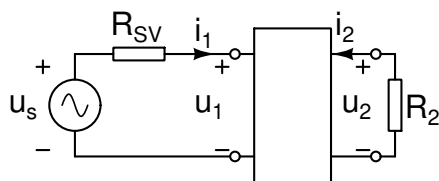
Vse napetosti merite z osciloskopom (amplitude ali pa vršne vrednosti). Pri meritvah mora biti amplituda vhodnega signala takšna, da ne pride do popačenja izhodnega signala. Kondenzatorja C_1 in C_2 sta dovolj velika, da jih lahko pri frekvenci merjenja zanemarimo (obravnavamo kot kratek stik). Za hibridne (h) parametre veljajo četrpolne enačbe:

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Vezava a: meritev h_{11} in h_{21}

Za meritev parametrov h_{11} in h_{21} uporabite vezavo a (preklopite ustrezna stikala na ploščici).



Vezju sta dodana dva upora ($R_{SV} = 4.7\text{k}\Omega$ in $R_2 = 10\Omega$, s pomočjo katerih lahko določimo tokova i_1 in i_2):

$$i_1 = \frac{u_s - u_1}{R_{SV}}$$

$$i_2 = -\frac{u_2}{R_2}$$

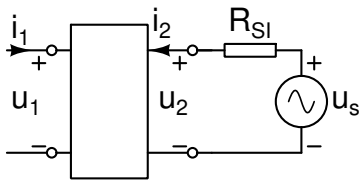
Ker je upor R_2 majhen, velja $u_2 \approx 0$ (kratek stik). Četrpolne enačbe se zato poenostavijo:

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

Vezava b: meritev h_{12} in h_{22}

Za meritev parametrov h_{12} in h_{22} uporabite vezavo b (preklopite ustrezna stikala na ploščici).



Zaradi odprtih sponk na vhodu je $i_1 = 0$, vezju pa je dodan upor $R_{SI} = 1.8\text{k}\Omega$, s katerim bomo določili i_2 :

$$i_2 = \frac{u_s - u_2}{R_{SI}}$$

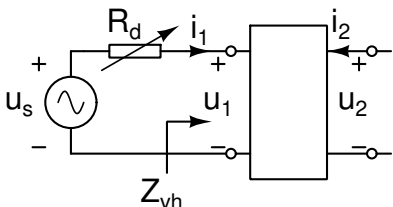
Četveropolne enačbe lahko v tem primeru zapišemo kot:

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0} \qquad h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

Meritev napetostnega ojačenja

Za meritev ojačenja uporabite osnovno vezje (odklopite stikala na ploščici). Na osciloskopu hkrati opazujte u_1 in u_2 (amplitudo in fazo) ter določite napetostno ojačenje (pazite na predznak) s pomočjo enačbe:

$$A_u = \frac{u_2}{u_1}$$

Meritev vhodne impedance

Za to meritev pustite na izhodu odprte sponke. Najprej izmerite izhodni signal u_2 pri priključenem signalnem viru u_s na vhodu vezja ($R_d = 0$, oz. kratek stik).

Nato v serijo s signalnim virom priključite še spremenljiv upor R_d (uporovna dekada). Z_{vh} in R_d tvorita napetostni delilnik. Ker je vezje linearno, velja:

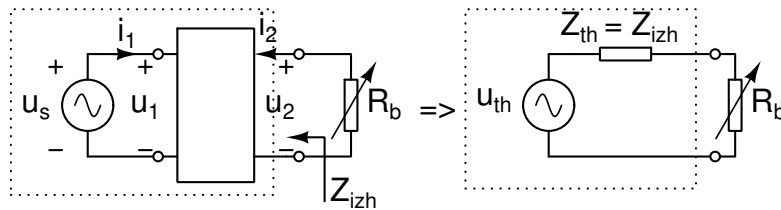
$$u_2 = A_u u_1 = A_u \frac{Z_{vh}}{R_d + Z_{vh}} u_s$$

Pri nespremenjenem u_s spreminjajte dekada R_d toliko časa, da pade amplituda izhodnega signala na polovico vrednosti, izmerjeni brez upora R_d (torej, ko je bil $R_d = 0$). Takrat velja:

$$R_d = Z_{vh}$$

Meritev izhodne impedance

Ker gre za linearno vezje, lahko uporabimo Thévenin-ovo nadomestno vezje:



Na izhod priključite spremenljiv bremenski upor R_b (uprovna dekada). Najprej izmerite izhodni signal u_2 pri $R_b = \infty$ (odprte sponke). Z_{izh} in R_b tvorita napetostni delilnik. Pri nespremenjenem u_s spreminjajte R_b toliko časa, da pade amplituda izhodnega signala na polovico vrednosti, izmerjene pri $R_b = \infty$. Takrat velja:

$$R_b = Z_{izh}$$

Rezultati - pazite na enote in predznak

$$h_{11} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$h_{12} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$h_{21} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$h_{22} = \underline{\hspace{2cm}}$$

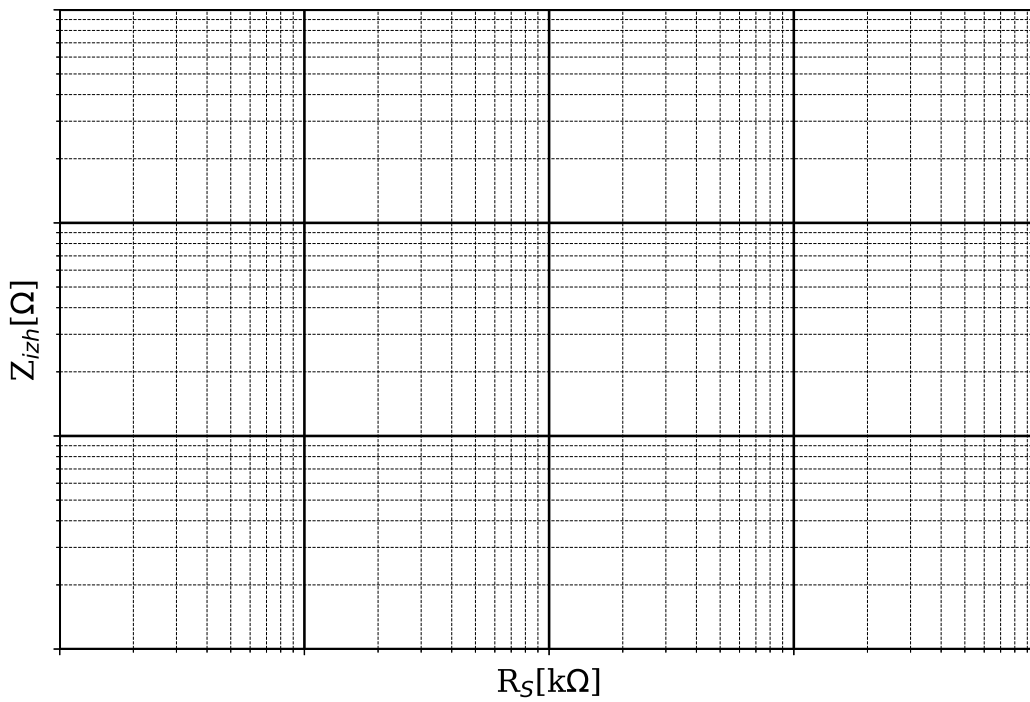
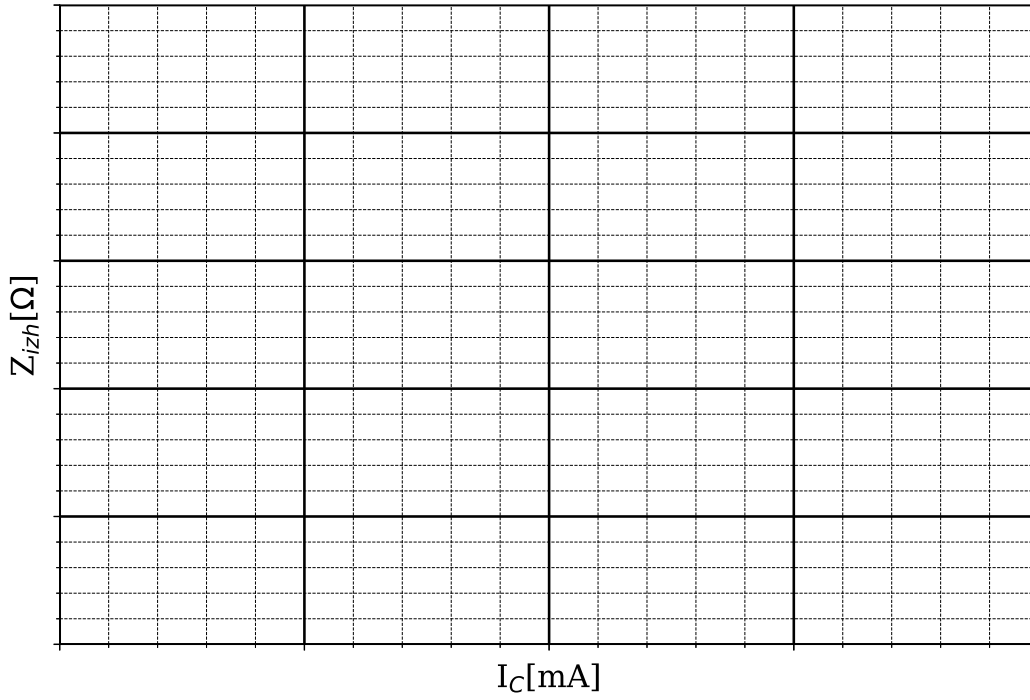
$$A_u = \underline{\hspace{2cm}}$$

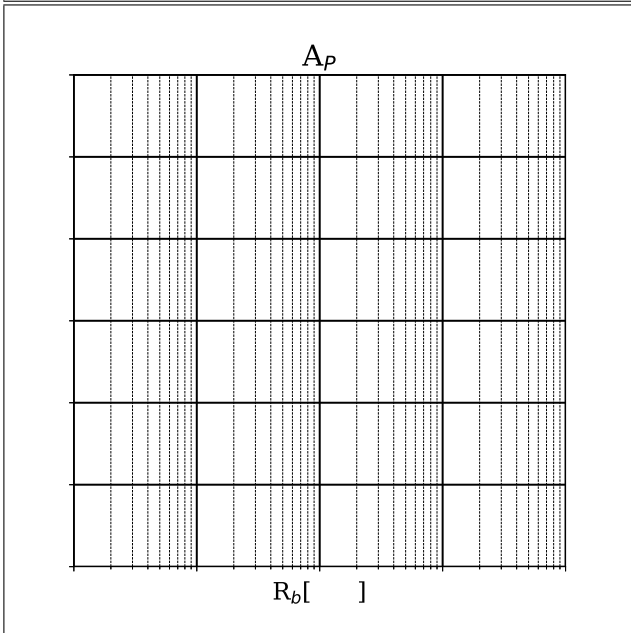
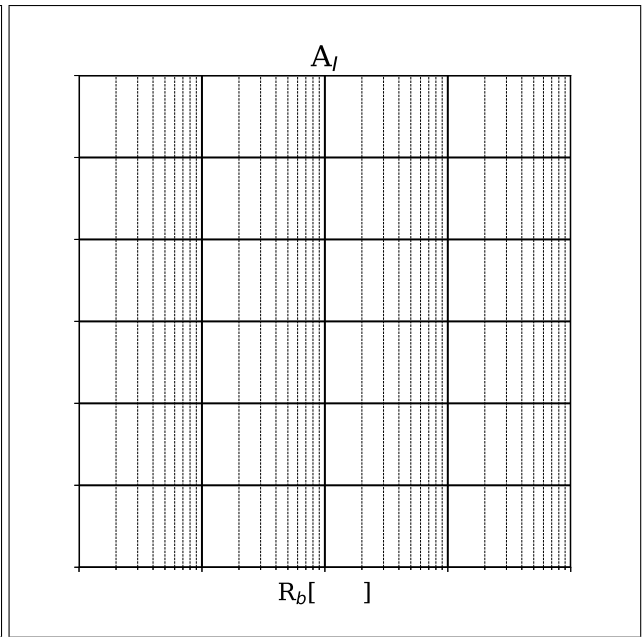
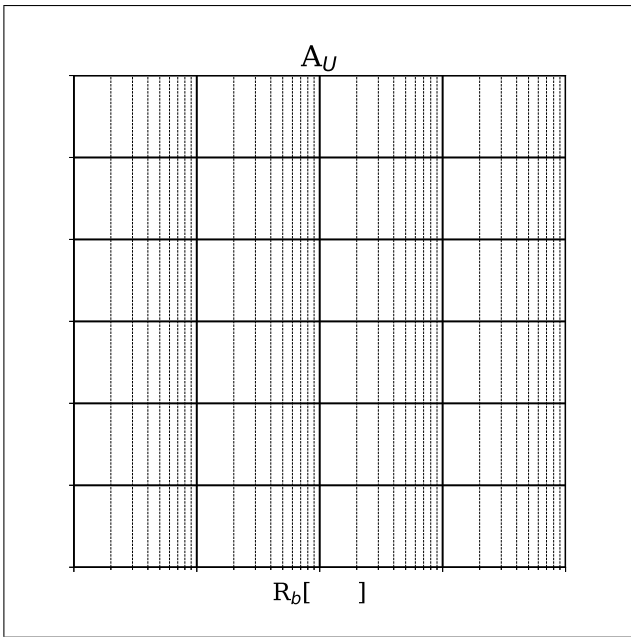
$$Z_{vh} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$Z_{izh} = \underline{\hspace{2cm}}$$

b) $I_C = 1\text{mA}$

$R_S[\text{k}\Omega]$	0	10	100	330	560	1000
$Z_{izh}[\Omega]$						



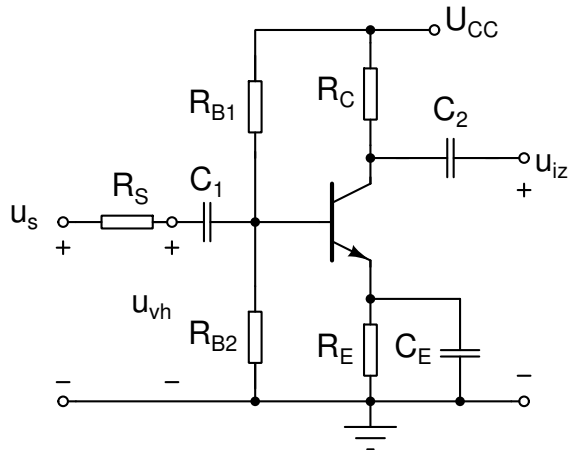


$$R_b |_{A_{P,max}} = \text{_____}$$

Vaja 4: Frekvenčne karakteristike ojačevalnika

Naloga

Imerite in narišite frekvenčno odvisnost napetostnega ojačenja in vhodne impedance.



$$U_{CC} = 15\text{V}, R_S = 100\text{k}\Omega$$

$$R_C = 2.2\text{k}\Omega, R_E = 2.2\text{k}\Omega$$

$$R_{B1} = 82\text{k}\Omega, R_{B2} = 27\text{k}\Omega$$

$$C_1 = C_2 = C_E = 47\mu\text{F}$$

Q_1 : BC546B bipolarni NPN tranzistor

Navodilo

Na merilni ploščici izberite ustrezno stikalo, da bo $C_E = 47\mu\text{F}$. Amplitudo vhodnega signala u_s nastavite tako, da izhodni signal ne bo popačen. Vse signale merite z osciloskopom. Izmerite in narišite frekvenčni potek napetostnega ojačenja A_u (v decibelih) in vhodne impedance Z_{vh} . Podana sta z enačbami:

$$A_u = \frac{u_{iz}}{u_{vh}} \rightarrow A_u[\text{dB}] = 20 \cdot \log(|A_u|)$$

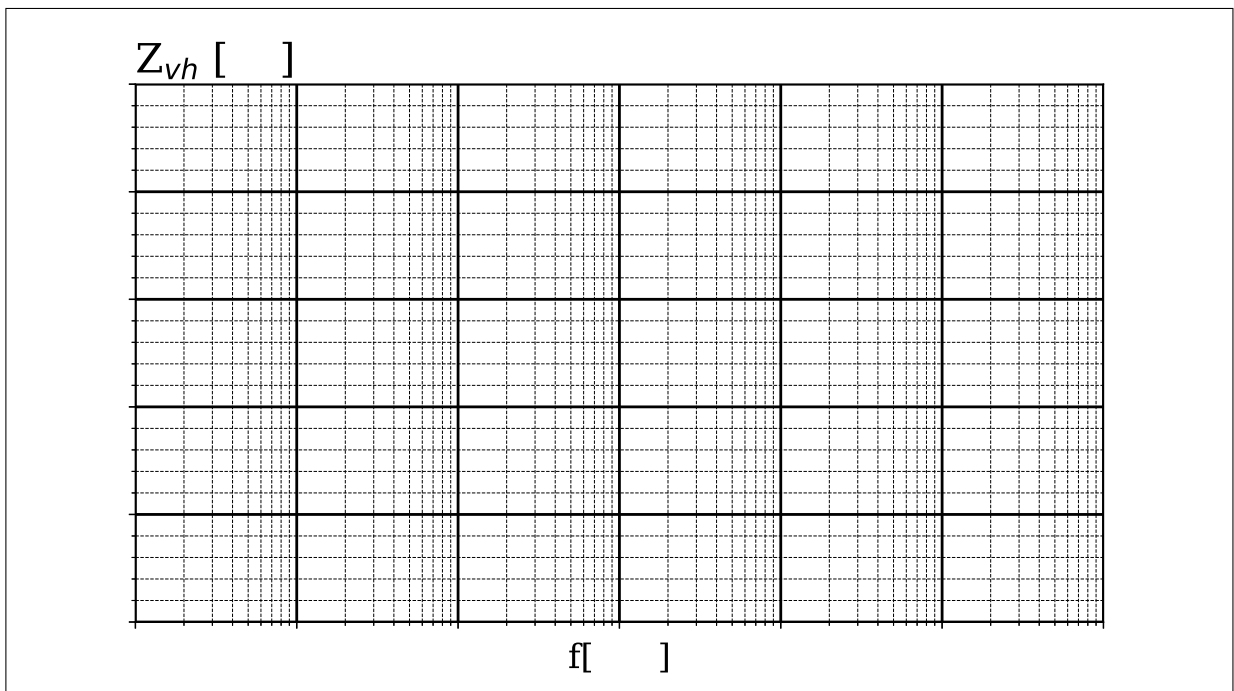
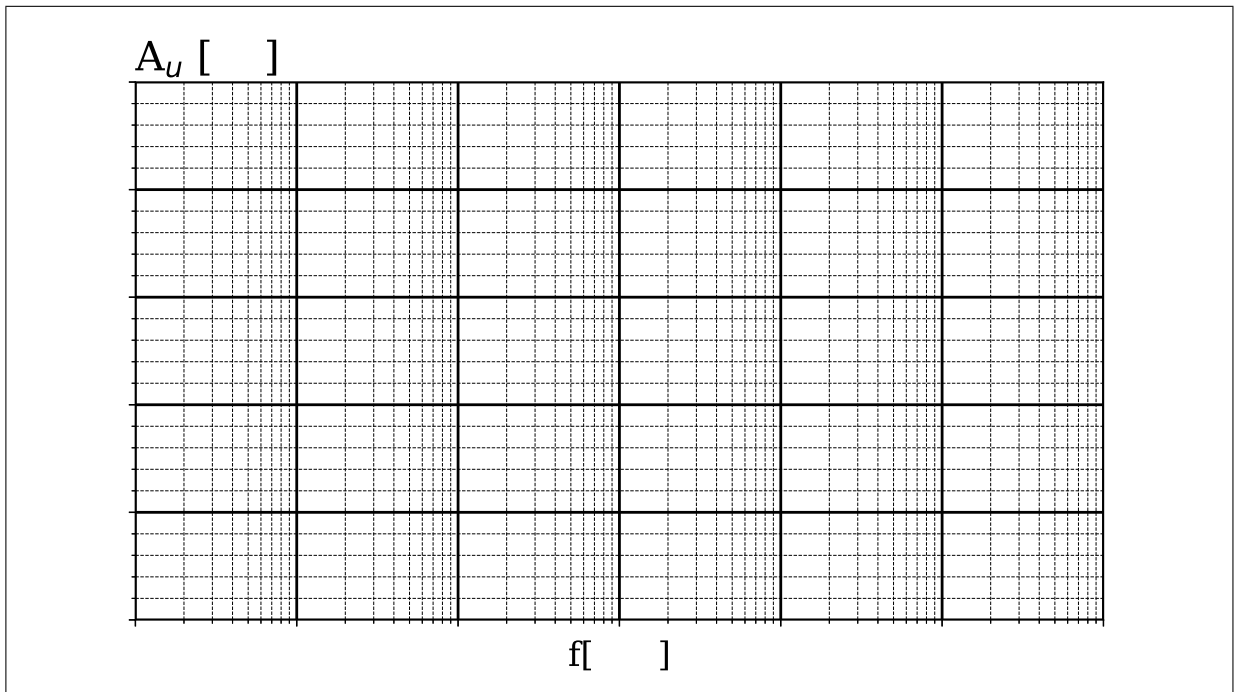
$$Z_{vh} = \frac{u_{vh}}{i_{vh}} = \frac{u_{vh}}{\frac{u_s - u_{vh}}{R_S}}$$

V srednje frekvenčnem območju je ojačenje A_u konstantno in ima tudi najvišjo vrednost $A_{u,max}$. Pri nizkih frekvencah bo A_u začel padati zaradi vpliva veznih (C_1, C_2) in premostitvenih (C_E) kondenzatorjev, pri visokih pa zaradi vpliva parazitnih kapacitivnosti tranzistorja. Merilno območje (frekvence) izberite tako, da bosta iz grafov razvidni tudi spodnja in zgornja frekvenčna meja. Definirani sta kot frekvenci, pri katerih pade napetostno ojačenje A_u za 3dB pod najvišjo vrednost pri srednjih frekvencah oz. na vrednost $\frac{A_{u,max}}{\sqrt{2}}$.

Pri meritvah z osciloskopom je potrebno upoštevati tudi vpliv merilne opreme na delovanje vezja. Naši osciloskopi in merilne sonde bodo s svojimi kapacitivnostmi obremenili vezje, kar vodi do merilnih napak. Pri frekvencah $f < 20\text{Hz}$ postane težava kapacitivnost AC sklopa, zato je potrebno te meritve izvajati z DC sklopom. Pri visokih frekvencah pa težave povzročajo kapacitivnosti sonde in vhodnega kanala, ki pri višjih frekvencah bolj zadržijo signal, kot pri nižjih. Izmerjeni signali bodo zato drugačni, kot če merilne opreme ne bi imeli priključene. Zato je pri visokih frekvencah za bolj natančne meritve uporabljati kompenzirana 1:10 (10x) sonda, ki zmanjša signal za faktor 10, vendar čez široko frekvenčno območje enako.

f []										
u_s []										
u_{vh} []										
u_{iz} []										
A_u []										
Z_{vh} []										

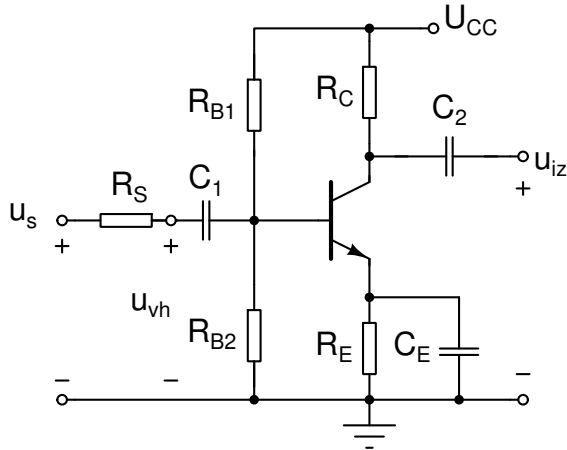
Rezultati



Vaja 5: Spodnja in zgornja frekvenčna meja ter razmerje $\frac{i_c}{u_{vh}}$

Naloga

Za različne vrednosti kondenzatorja C_E izmerite spodnjo in zgornjo frekvenčno mejo za napetostno ojačenje. Izmerite tudi odvisnost razmerja $\frac{i_c}{u_{vh}}$ od bremena.



$$U_{CC} = 15\text{V}, R_C = 2.2\text{k}\Omega$$

$$R_E = 2.2\text{k}\Omega, R_{B1} = 82\text{k}\Omega$$

$$R_{B2} = 27\text{k}\Omega, C_1 = C_2 = 47\mu\text{F}$$

Q_1 : BC546B bipolarni NPN tranzistor

Navodilo

Meritev a: vpliv kondenzatorja C_E na frekvenčne meje

Za to meritev priključite signalni vir neposredno na sponko u_{vh} in tako izločite vpliv upora R_S na frekvenčni odziv vezja (pri prejšnji vaji smo ga uporabili za določitev vhodnega toka v tranzistor). Upor R_S namreč s kondenzatorjem C_1 ter uporoma R_{B1} in R_{B2} ter z vhodno upornostjo tranzistorja tvori RC člen in s tem precej zniža zgornjo frekvenčno mejo samega ojačevalnika. Za različne vrednosti C_E (stikala na ploščici) nato določite spodnjo in zgornjo frekvenčno mejo za napetostno ojačenje $A_u = \frac{u_{iz}}{u_{vh}}$. Najprej poiščite frekvenco, pri kateri je napetostno ojačenje (oz. amplituda izhodnega signala) največje ($A_{u,max}$). Nato za določitev spodnje (zgornje) frekvenčne meje nižajte (višajte) frekvenco toliko časa, da pade ojačenje na vrednost $\frac{A_{u,max}}{\sqrt{2}}$ (oz. za 3dB).

Rezultati a

C_E [μF]	0.1	1	10	47	100
f_{sp} []					
f_{zg} []					

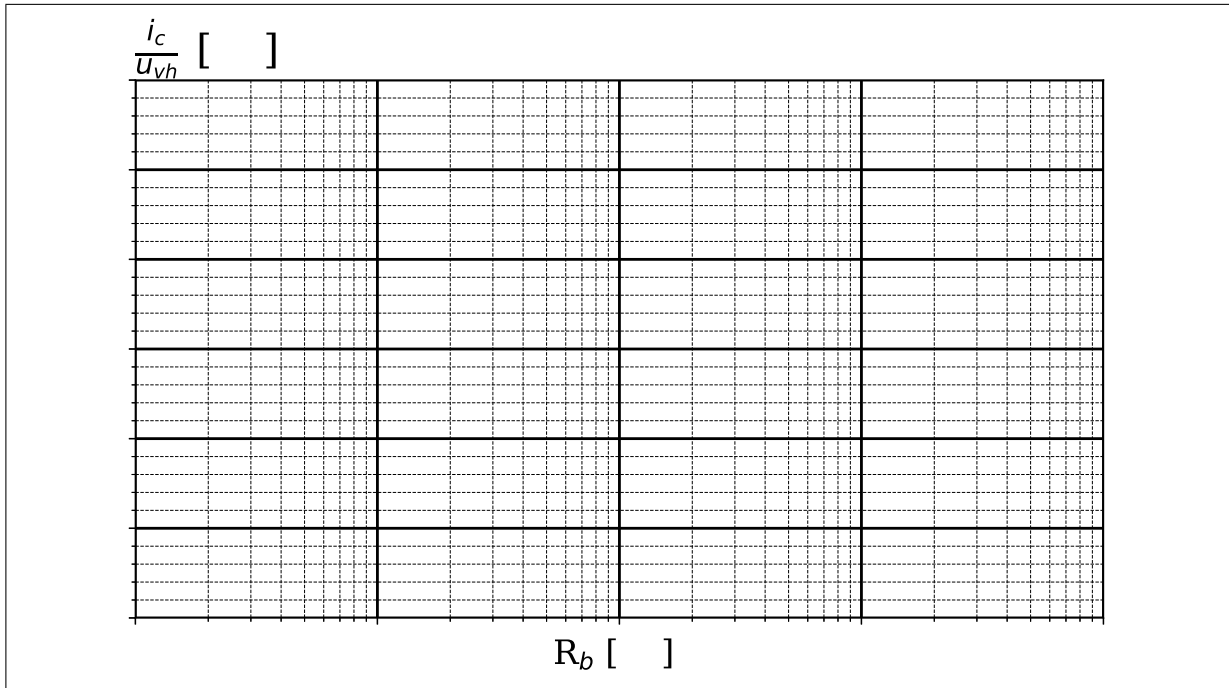
Meritev b: vpliv bremena na razmerje $\frac{i_c}{u_{vh}}$

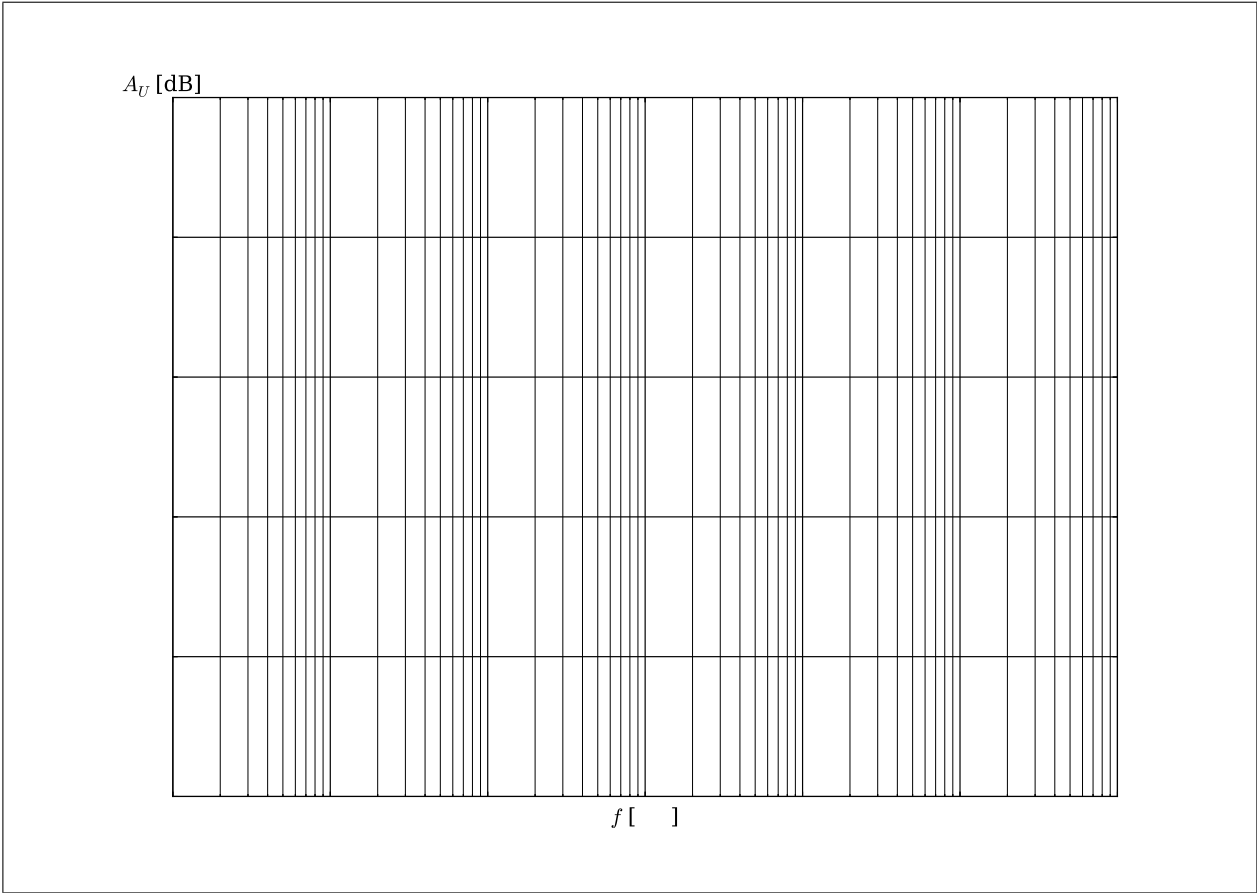
Nastavite $C_E = 100\mu\text{F}$. Na izhod vezja priključite uporovno dekado R_b , ki bo služila kot breme. Pri frekvenci $f = 1\text{kHz}$ izmerite odvisnost $\frac{i_c}{u_{vh}}$ od bremenske upornost R_b . Pri tem upoštevajte, da sta za izmenične signale R_C in R_b vezana vzporedno, torej velja:

$$i_c = \frac{u_{iz}}{R_C || R_b}$$

Rezultati b

R_b []					
u_{vh} []					
u_{iz} []					
i_c []					
$\frac{i_c}{u_{vh}}$ []					



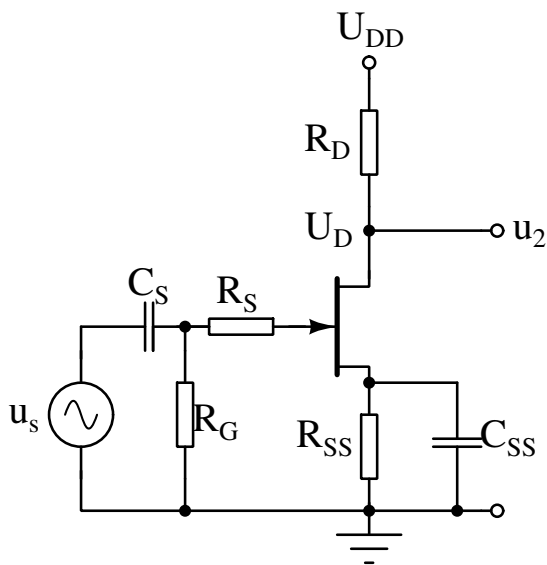


Vaja 7: Ojačevalnik v orientaciji s skupnim izvorom in kaskodni ojačevalnik

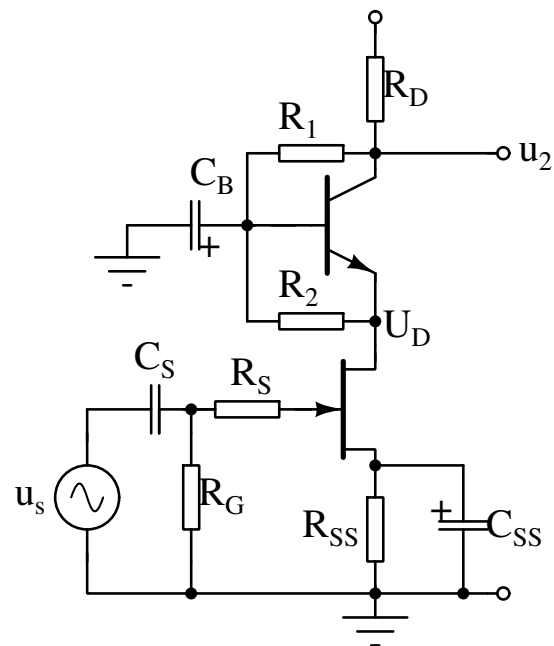
Naloga

Za ojačevalnik s spojnim tranzistorjem JFET (vezje a) in za hibridni kaskodni ojačevalnik (vezje b) izmerite in narišite frekvenčni potek napetostnega ojačenja. Iz meritev pri srednjih frekvencah (5 kHz) in zgornjih frekvenčnih mej za obe vezji določite transkonduktanco $g_{21,JFET}$ ter kapacitivnosti C_{gs} in C_{gd} .

Vezje a



Vezje b



$$U_{DD} = 12\text{V}, R_D = 1.2\text{k}\Omega, R_S = 15\text{k}\Omega, R_{SS} = 220\text{k}\Omega, R_G = 10\text{M}\Omega, C_S = 100\text{nF}, \\ C_{SS} = 220\mu\text{F}, R_1 = 47\text{k}\Omega, R_2 = 8.2\text{k}\Omega, C_B = 2.2\mu\text{F}$$

Vezje a

JFET tranzistor je vezan v orientaciji s skupnim izvorom. Za srednje frekvence je napetostno ojačenje (ob predpostavki, da je $g_{22,JFET} \ll \frac{1}{R_D}$) podano kot :

$$A_{U,a} = -\frac{g_{21,JFET}}{g_{22,JFET} + 1/R_D} \approx -g_{21,JFET}R_D$$

Zgornjo frekvenčno mejo določajo parazitne kapacitivnosti tranzistorja C_{gs} in C_{gd} . Zaradi t.i. Miller-jevega pojava se kapacitivnost C_{gd} preslika v Miller-jevo kapacitivnost C_M na vhod vezja (paralelno s C_{gs}) s faktorjem ojačenja tranzistorja:

$$C_{M,a} = C_{gd}(1 + g_{21,JFET} \cdot R_D)$$

Kapacitivnosti C_{gs} in $C_{M,a}$ tvorita skupaj z uporom R_S RC člen, ki določa zgornjo frekvenčno mejo vezja:

$$f_{H,a} = \frac{1}{2\pi R_S(C_{gs} + C_{M,a})} = \frac{1}{2\pi R_S(C_{gs} + C_{gd}(1 + g_{21,JFET} \cdot R_D))}$$

Pri meritvi za vezje si zabeležite tudi enosmerno vrednost potenciala na ponoru tranzistorja U_D v delovni točki. Potrebovali jo boste pri vezju b, saj bo potrebno za kaskodni ojačevalnik zagotoviti isto delovno točko tranzistorja JFET.

Vežje b

Pri hibridnem kaskodnem ojačevalniku je tranzistor JFET še vedno vezan v orientaciji s skupnim izvorom. Vendar pa sedaj ni več obremenjen z uporom R_D , ampak z vhodno impedanco bipolarnega tranzistorja. Le-ta je vezan v orientaciji s skupno bazo, ki ima majhno vhodno impedanco ($Z_{vh,b} \approx 25\Omega$). Napetostno ojačenje tranzistorja JFET je tako precej manjše ($g_{21,JFET} Z_{vh,b} \ll 1$), zato je tudi učinek Miller-jeve preslikave manjši:

$$C_{M,b} = C_{gd}(1 + g_{21,JFET} \cdot Z_{vh,b}) \approx C_{gd}$$

Zgornja frekvenčna meja celotnega vezja je tudi v tem primeru določena predvsem z RC členom na vhodu, le da je sedaj skupna kapacitivnost na vhodu manjša in s tem frekvenčna meja višja:

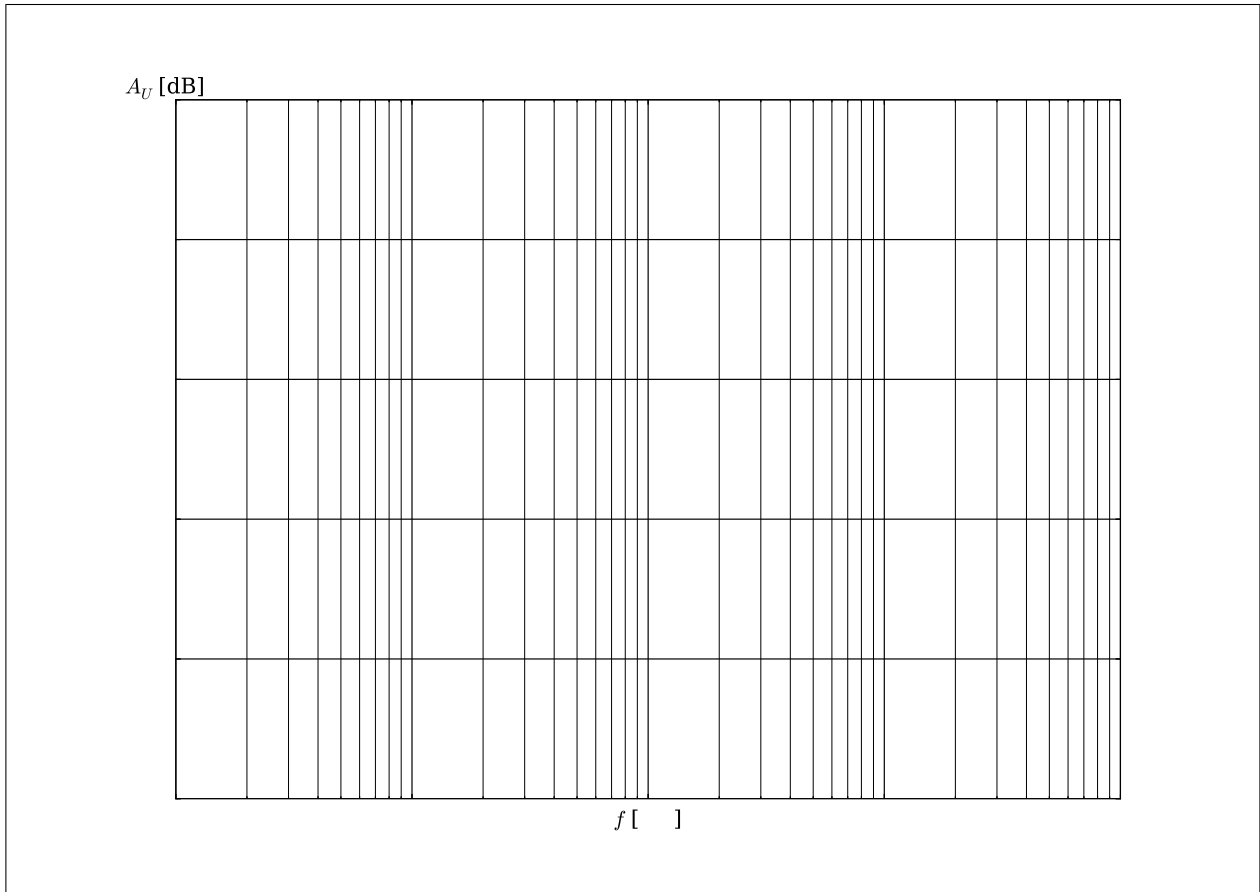
$$f_{H,b} = \frac{1}{2\pi R_S(C_{gs} + C_{M,b})} = \frac{1}{2\pi R_S(C_{gs} + C_{gd})}$$

Bipolarni tranzistor je v kaskodnem ojačevalniku vezan v orientaciji s skupno bazo, ki ima tokovno ojačenje $A_i \approx 1$. Zato teče skozi R_D skoraj enak tok, kot pri vezju a. Je pa sedaj za majhne izmenične signale paralelno k R_D vezan še R_1 . Napetostno ojačenje kaskode je tako podano kot:

$$A_{U,b} = -g_{21,JFET}(R_D || R_1)$$

Če želimo zagotoviti podobno ojačenje kot pri vezju a, je potrebno za tranzistor JFET zagotoviti enako delovno točko. To boste dosegli z višanjem napajalne napetosti U_{CC} do takšne vrednosti, da bo ponor tranzistorja JFET (U_D) na istem potencialu, kot pri vezju a.

f []								
$u_{s,a}$ []								
$u_{2,a}$ []								
$A_{U,a}$								
$A_{U,a}$ [dB]								
$u_{s,b}$ []								
$u_{2,b}$ []								
$A_{U,b}$								
$A_{U,b}$ [dB]								

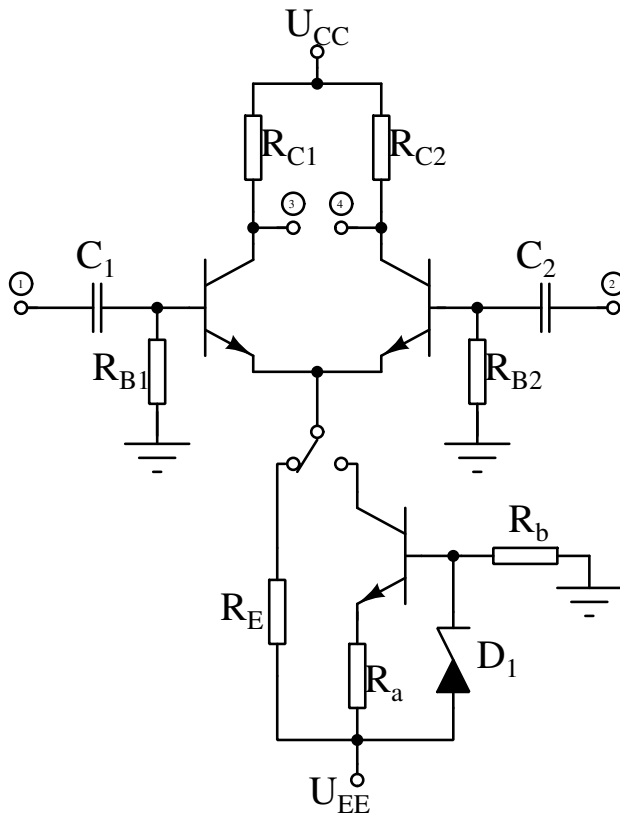


$$\begin{aligned}
 A_{U,a}(5kHz) &= \underline{\hspace{2cm}} & f_{H,a} &= \underline{\hspace{2cm}} \\
 A_{U,b}(5kHz) &= \underline{\hspace{2cm}} & f_{H,b} &= \underline{\hspace{2cm}} \\
 C_{gs} &= \underline{\hspace{2cm}} & C_{gd} &= \underline{\hspace{2cm}}
 \end{aligned}$$

Vaja 8: Diferencialni ojačevalnik

Naloga

Za diferencialni ojačevalnik izmerite rejekcijski faktor (CMRR), če je delovna točka zagotovljena s pomočjo emitorskega upora R_E oziroma s pomočjo tokovnega vira. Meritev izvedite pri frekvenci 10 kHz.



$$\begin{aligned}
 U_{CC} &= 10\text{V}, U_{EE} = -10\text{V}, \\
 R_{C1} &= 3.9\text{k}\Omega, R_{C2} = 3.9\text{k}\Omega, \\
 R_{B1} &= 180\text{k}\Omega, R_{B2} = 180\text{k}\Omega, \\
 R_E &= 3.9\text{k}\Omega, \\
 C_1 &= 1\mu\text{F}, C_2 = 1\mu\text{F}, \\
 U_{D1} &= 4.7\text{V pri } I_{D1} > 5\text{mA}, \\
 R_a &= 1.5\text{k}\Omega, R_b = 470\Omega
 \end{aligned}$$

Vezje a

Pri vezju a je delovna točka nastavljena s pomočjo upora R_E (izberite s stikalom na ploščici). Zaradi nesimetrije tranzistorjev in uporov R_{C1} in R_{C2} se pojavi razlika v kolektorskih tokovih tranzistorjev v diferencialnem paru. Rejeksijski faktor (CMRR - common mode rejection ratio) ojačevalnika je definiran kot razmerje med protifaznim oz. diferenčnim (A_d) in sofaznim (A_{cm}) ojačenjem:

$$CMRR = \frac{A_d}{A_{cm}}$$

Idealen diferencialni ojačevalnik ima velik CMRR, kar pomeni, da ojača diferenčni signal in čim bolj zaduši sofazni signal. Nesimetrija v vezju je razlog za večje sofazno ojačenje in s tem za manjši CMRR.

Vezje b

Delovna točka je v tem primeru nastavljena s pomočjo tokovnega vira (izberite s stikalom na ploščici), ki je načrtovan tako, da je skupni tok obeh tranzistorjev približno enak kot v vezju a (ista delovna točka). Emitorska sponka tranzistorjev v diferencialnem paru je tako obremenjena z

notranjo upornostjo tokovnega vira, ki je precej višja od R_E iz vezja a. Sofazno ojačenje (in s tem tudi CMRR) je neposredno odvisno od te upornosti, zato ima vezje b precej večji CMRR.

Meritev

Z meritvijo enosmernih vrednosti potencialov na kolektorjih izmerite oba kolektorska toka in njuno razliko:

$$U_{C1} = \text{_____}, I_{C1} = \frac{U_{CC} - U_{C1}}{R_{C1}} = \text{_____}$$

$$U_{C2} = \text{_____}, I_{C2} = \frac{U_{CC} - U_{C2}}{R_{C2}} = \text{_____}$$

$$\Delta I_C = \text{_____}$$

Protifazno ojačenje

Signalni vir u_s priključite med oba vhoda (sponki 1 in 2). Izhodni signal opazujte na kolektorju tranzistorja (sponka 3). Če je v signalih prisoten močan šum, lahko za lažjo meritev eno od vhodnih sponk tudi ozemljite. Protifazno oz. diferenčno ojačenje je podano kot:

$$A_d = \frac{u_3}{u_s} = \frac{u_3}{u_1 - u_2}$$

	u_s []	u_3 []	A_d	A_d [dB]
R_E				
<i>tok.vir</i>				

Sofazno ojačenje

Oba vhoda (sponki 1 in 2) kratko sklenite in nanju priključite signalni vir u_s . Tudi v tem primeru nas zanima asimetričen izhod na sponki 3.

$$A_{cm} = \frac{u_3}{u_s} = \frac{u_3}{u_1} = \frac{u_3}{u_2}$$

	u_s []	u_3 []	A_{cm}	A_{cm} [dB]
R_E				
<i>tok.vir</i>				

Rejekcijski faktor CMRR

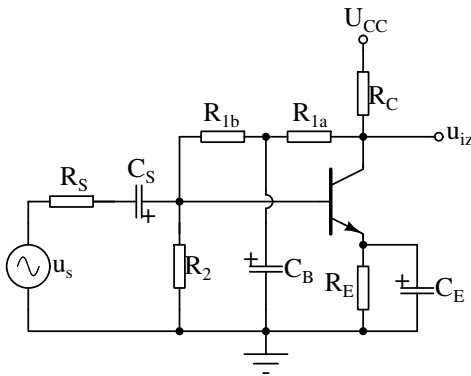
	CMRR	CMRR [dB]
R_E		
<i>tok.vir</i>		

Vaja 9: Povratna vezava

Naloga

Izmerite frekvenčni potek napetostnega ojačenja $A_u = \frac{u_{iz}}{u_s}$. Narišite Bode-jev diagram amplitude (v decibelih) za primere:

- C_E in C_B sta odklopljena
- C_E je priključen, C_B je odklopljen
- C_E in C_B sta priključena



$$\begin{aligned}
 U_{CC} &= 15\text{V}, R_S = 470\Omega, \\
 R_{1a} &= 22\text{k}\Omega, R_{1b} = 18\text{k}\Omega, \\
 R_2 &= 6.8\text{k}\Omega, R_C = 2.2\text{k}\Omega, \\
 R_E &= 220\Omega, C_E = 25\text{nF}, \\
 C_S &= 4.7\mu\text{F}, C_B = 15\text{nF}
 \end{aligned}$$

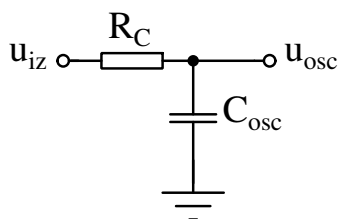
Meritev

Upori v vezju določajo delovno točko tranzistorja, hkrati pa tvorijo povratne vezave, ki zmanjšujejo napetostno ojačenje in zvišujejo pasovno širino ojačevalnika:

- R_{1a} in R_{1b} tvorita zaporedno-vzporedno povratno vezavo
- R_E tvori zaporedno-zaporedno povratno vezavo

Kondenzatorja C_B in C_E predstavljata za izmenične signale (pri dovolj visokih frekvencah) kratek stik. Če je v vezju C_B , se s tem za izmenične signale prekine povratna vezava preko R_{1a} in R_{1b} . Posledično se zviša napetostno ojačenje, hkrati pa se zmanjša pasovna širina ojačevalnika. Podobno lahko s priključitvijo C_E za izmenične signale prekinemo povratno vezavo preko R_E in dodatno zvišamo ojačenje spet pa se s tem zmanjša pasovna širina celotnega ojačevalnika.

Pri merjenju nizko-frekvenčnih signalov ($f < 5\text{Hz}$) je potrebno paziti na spodnjo frekvenčno mejo osciloskopa in meritve izvajati z DC sklopom. Pri visokih frekvencah pa je potrebno upoštevati, da imata tudi sonda osciloskopa in sam osciloskop svojo kapacitivnost (skupaj C_{osc}), ki obremeni vezje. Skupaj z izhodno upornostjo ojačevalnika ($\approx R_C$) tvorita RC člen, kar pomeni, da je izmerjena vrednost izhodne napetosti premajhna. Težavo lahko rešimo z uporabo 10x kompenzirane sonde, pri 1x sondah pa s korekcijo izmerjene izhodne napetosti:



$$\begin{aligned}
 U_{osc} &= U_{iz} \frac{1/j\omega C_{osc}}{R_C + 1/j\omega C_{osc}} = U_{iz} \frac{1}{1 + j\omega R_C C_{osc}} \\
 |U_{iz}| &= |U_{osc}| \sqrt{1 + (2\pi f R_C C_{osc})^2}
 \end{aligned}$$

Rezultati

	$f [\quad]$										
A	$u_s [\quad]$										
	$u_{izh} [\quad]$										
	A_U										
	$A_U [dB]$										
B	$u_s [\quad]$										
	$u_{izh} [\quad]$										
	A_U										
	$A_U [dB]$										
C	$u_s [\quad]$										
	$u_{izh} [\quad]$										
	A_U										
	$A_U [dB]$										

